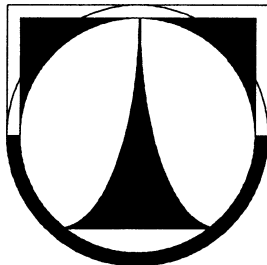


**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA STROJNÍ**

Katedra vozidel a motorů



**OSOBNÍ AUTOMOBIL ŠA ROOMSTER S VODÍKOVÝM  
MOTOREM**

**PERSONAL CAR ŠA ROOMSTER WITH A HYDROGEN  
ENGINE**

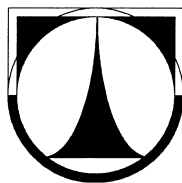
**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Pavel Šíma

Květen 2008

**TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI**

**FAKULTA STROJNÍ**



**Katedra vozidel a motorů**

**Obor 23 – 17 – 8**

**Konstrukce strojů a zařízení**

**Zaměření**

**Pístové spalovací motory**

**OSOBNÍ AUTOMOBIL ŠKODA ROOMSTER S VODÍKOVÝM  
MOTOREM**

**PERSONAL CAR ŠKODA ROOMSTER WITH A HYDROGEN  
ENGINE**

**Diplomová práce**

**KSD – DP – 001**

**Pavel Šíma**

Vedoucí diplomové práce: Doc. Ing. Celestýn Scholz, Ph.D

Konzultant diplomové práce: Ing. Pavel Brabec

Počet stran: 61

Počet obrázků: 66

Květen 2008

**Místo pro vložení originálního zadání DP (BP)**

# **Osobní automobil ŠA Roomster s vodíkovým motorem**

## **Anotace**

Cílem práce je určit optimální místo pro uskladnění stlačeného vodíku ve vozidle Škoda Roomster při využití současných poznatků o problematice použití vodíku jako paliva u osobních automobilů.

Klíčová slova: vodík, Škoda Roomster

# **Personal car ŠA Roomster with a hydrogen engine**

## **Annotation**

Main goal of this thesis is to find optimal place for storing cylinders with compressed hydrogen on board of personal car Škoda Roomster. It is based on a present knowledge about using compressed hydrogen as a fuel in personal vehicles.

Key words: hydrogen, Škoda Roomster

Zpracovatel:

TU v Liberci, Fakulta strojní, Katedra vozidel a motorů

Dokončeno :

23.5.2008

Archivní označení zprávy:

## Prohlášení k využívání výsledků diplomové práce

Byl jsem seznámen s tím, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že technická univerzita v Liberci (TUL) nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu TUL.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti TUL; v tomto případě má TUL právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Diplomovou práci jsem vypracoval samostatně s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím diplomové práce a konzultantem.

V ..... dne .....

.....  
podpis

## Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Doc. Ing. Celestýnu Scholzovi, Ph.D a konzultantu Ing. Pavlovi Brabcovi za mnoho cenných rad, oddělení TPP – vývoj podvozku firmy Škoda Auto, a.s. za poskytnutí potřebných podkladů a materiálů o voze Škoda Roomster a ochotnou spolupráci a v neposlední řadě celé své rodině za podporu, bez níž by tato práce nemohla vzniknout.

## Seznam symbolů a jednotek

$p$	tlak	[MPa]
$F_K$	síla na kole	[N]
$G$	tíha	[N]
$c_x$	součinitel odporu vzduchu	[-]
$S_x$	čelní plocha vozidla	[m <sup>2</sup> ]
$v$	rychlost	[m/s]
$m$	hmotnost	[kg]
$u$	součinitel rotačních hmot vozidla	[-]
$a$	zrychlení	[m/s <sup>2</sup> ]
$f$	součinitel odporu valení	[-]
$r$	poloměr kola	[m]
$M_M$	točivý moment motoru	[Nm]
$M_K$	točivý moment na kole	[Nm]
$i_P$	převodový poměr v převodovce	[-]
$i_S$	stálý převodový poměr	[-]
$\eta_M$	mechanická účinnost	[-]
$n_K$	otáčky kola	[1/min]
$n_M$	otáčky motoru	[1/min]
$P_M$	výkon motoru	[kW]
$M_P$	hmotnostní spotřeba paliva	[g/s]
$H_u$	výhřevnost	[kJ/kg]
$m_{Pe}$	měrná spotřeba paliva	[g/kWh]

## Obsah

Seznam použitých symbolů a jednotek.....	7
Obsah.....	8
1 Vodík a jeho využití k pohonu vozidel.....	9
1.1 Motivace pro zavedení alternativních paliv .....	9
1.2 Základní vlastnosti vodíku .....	9
1.3 Výroba vodíku .....	11
1.3.1 Popis jednotlivých technologií výroby vodíku.....	12
1.4 Historie využití vodíku k pohonu vozidel .....	15
1.4.1 Vozidla spalující vodík přímo v motoru.....	16
1.4.1.1 BMW .....	16
1.4.1.2 FORD.....	19
1.4.2 Vozidla využívající palivové články .....	20
1.4.2.1 HONDA .....	20
1.4.2.2 TOYOTA .....	26
1.4.2.3 GENERAL MOTORS .....	28
2 Vhodné alternativy pro uskladnění stlačeného vodíku ve vozidle .....	32
2.1 Všeobecné podmínky pro uskladnění.....	32
2.2 Alternativy umístění nádrží na stlačený plyn ve voze.....	32
2.3 Palivový systém.....	34
2.3.1 Plnicí ventil.....	35
2.3.2 Nádrže.....	35
2.3.2.1 Druhy tlakových nádob.....	36
2.3.3 Pojistný ventil .....	37
2.3.4 Vedení vodíku .....	37
2.3.5 Regulační ventil.....	38
2.4 Bezpečnostní opatření.....	39
2.4.1 Normy a předpisy pro kompozitové nádoby na stlačený plyn .....	40
3 Aplikace vybraného řešení vodíkového pohonu do vozu Škoda Roomster .....	41
3.1 Základní informace o voze .....	41
3.2 Současný stav .....	43
3.3 Aplikované prvky vodíkového pohonu a jejich umístění.....	45
3.3.1 Výpočet spotřeby paliva .....	47
3.3.2 Nádrže na stlačený vodík, pojistné ventily .....	52
3.3.3 Plnicí ventil.....	55
3.3.4 Regulační ventil.....	56
3.4 Zobrazení zabudovaného vodíkového palivového systému .....	58
4 Závěr .....	60
5 Seznam použité literatury .....	61



# 1 Vodík a jeho využití k pohonu vozidel

## 1.1 Motivace pro zavedení alternativních paliv

Při stále rostoucích cenách ropy a následně tedy i produktů, které z ní vycházejí, nastává čas využití alternativních paliv. Automobilový průmysl se snaží najít nová řešení. Při stoupajícím počtu vozidel je nutné zajistit co možná nejekologičtější způsob přepravy, aby zátěž životního prostředí byla minimální.

Existuje několik druhů paliv, která by mohla v budoucnu nahradit dnešní konvenční paliva – benzin a naftu. Každé má své nepochybné výhody, ale také nedostatky, které je nutné v budoucnu odstranit. Dle mého názoru záleží na globálním rozhodnutí předních světových ekonomik, jakou cestou se automobilový průmysl vydá. Rozhodující bude finanční otázka. Pokud se dá předpokládat vysoké zvýhodnění jednoho druhu paliva, ať se jedná o daňové úlevy nebo různé dotace na potřebnou infrastrukturu, stane se podle mého soudu takové palivo dominantní stejným způsobem, jako jsou dnes benzin a nafta. Srovnání alternativních paliv je zveřejňováno nejrozličnějšími periodiky víceméně pravidelně, odborněji se dané problematice věnuje například Prof. Ing. František Vlk, DrSc. ve svých publikacích *Paliva a maziva motorových vozidel* a *Alternativní pohony motorových vozidel*.

Tématem diplomové práce je přestavba vozu Škoda Roomster na vodíkový pohon. Byť je do značné míry českou legislativou opomíjen a do budoucna se s jeho využitím v ČR příliš nepočítá, ve světovém měřítku je v něm spatřováno perspektivní bezemisní palivo. Domnívám se, že cesta k využití vodíku vede přes jiná a nutno říct, že dnes již víceméně běžná paliva, jako jsou CNG a LPG. Zejména palivový systém na stlačený zemní plyn je svou skladbou a požadavky na umístění jednotlivých komponentů velmi blízký pohonu na vodík. Naopak za dobrou volbu nepovažuji biopaliva. Jejich přínos je diskutabilní, neboť po jejich zavedení došlo k nárůstu cen potravin. Dalším podstatným problémem je ohromná plocha, na které by se musely bioplodiny pěstovat. Podle nejnovějších výzkumů Stanfordovy univerzity v Kalifornii (USA) navíc spalováním biopaliva E85, což je směs 85% biolihiu a 15% benzínu, může docházet ke zvýšení koncentrace některých karcinogenních látek v ovzduší.

## 1.2 Základní vlastnosti vodíku

Vodík, latinsky Hydrogenium (chemická značka H), je nejrozšířenějším prvkem ve vesmíru. Na Zemi zaujímá ve statistice četností výskytu třetí místo a to prakticky jen ve formě sloučenin, zatímco ve vesmíru se vyskytuje i jako volný prvek (například v obalech hvězd). Jedná se o nejjednodušší prvek, jádra má tvořena jedním protonem. Existují další dva izotopy.

Deuterium má v jádře obsažen kromě jednoho protonu i jeden neutron, tritium má v jádře proton a dva neutrony. Tritium je ovšem nestabilní, poločas rozpadu je 12,4 roku. Atomy vodíku jsou velmi reaktivní. Navzájem se spojují a vytváří molekulu  $H_2$ , která je díky silné vazbě stabilní a málo reaktivní.

Možnosti využití vodíku jako paliva pro dopravní prostředky jsou dvě. Vodík lze spalovat přímo ve spalovacím motoru, který se jen málo liší od současných zážehových motorů, nebo jej lze nechat reagovat s kyslíkem a vytvářet tak elektrickou energii, která následně pohání elektromotor. Ekologicky šetrnější je druhý způsob. O jeho zavedení do praxe se zatím nejvíce snaží japonská Honda. I přesto se, stejně jako například vedoucí inženýr oddělení pro vodíkové technologie a palivové články automobilky Ford Scott Stanley, domnívám, že přímé spalování vodíku by mohlo být spojovacím prvkem mezi přechodem ze spalování fosilních paliv k ekologicky čistým elektromobilům poháněným palivovými články.

Při snaze chápat vodík jako palivo pro pohon vozidel je vhodné srovnání jeho vlastností s konvenčním palivem, tj. benzinem a například s kapalným propanem. Toto srovnání je uvedeno v tabulce 1.

Palivo (20 °C) druh/skupenství	Hustota [kg/m <sup>3</sup> ]	Měrný objem [l/kg]	M.O. vzt. k benzínu	Výhřevnost [MJ/kg]	Hustota energie [MJ/l]	H.E. vzt. k benzínu
Vodík 0,1 MPa	0,084	11939	8354,7	119	0,01	0,0003
Vodík 25 MPa	17	58,8	41,15	119	2,024	0,065
Vodík 35 MPa	22,2	45,2	31,6	119	2,64	0,085
Vodík 70 MPa	39	25,9	18,14	119	4,6	0,15
Vodík kapalný (-253 °C)	71,08	14,1	9,85	119	8,46	0,27
Propan kapalný	498	2	1,4	46,3	23,08	0,74
Benzín kapalný	700	1,43	1	44,5	31,15	1

Tabulka 1 – Vlastnosti vodíku a jeho porovnání s benzinem (Česká vodíková technologická platforma – [www.hytep.cz](http://www.hytep.cz), Petr Dlouhý, Luděk Janík, 25.1.2007, [4])

Tabulka 1 ukazuje, že vodík disponuje vyšší výhřevností než obě zmiňovaná paliva. Mnohem podstatnější jsou ovšem hodnoty hustoty energie. Vyjadřuje množství energie obsažené v daném objemu paliva. Zde je patrné, že vodík má při tlaku 35 MPa zhruba 12x nižší hodnotu proti benzínu. Částečné zlepšení je vidět při zvýšení tlaku na 70 MPa. Hodnota hustoty energie dosahuje 15% hustoty energie benzínu, což je tedy zhruba 7x menší hodnota.

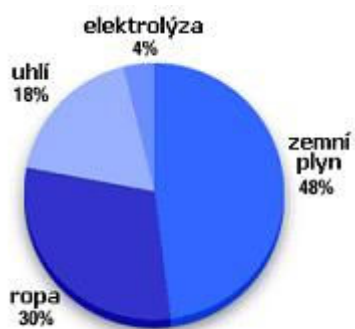
Vodík má mnoho problematických vlastností, které komplikují jeho nasazení. Ve směsi se vzduchem tvoří hořlavou a výbušnou směs a to ve velmi širokém spektru koncentrací. Hořlavá směs je tvořena při zastoupení 4 – 75% vodíku, výbušná je směs při

koncentraci 19 – 59% vodíku. Pokud vodík rychle expanduje, hrozí nebezpečí samovznícení. Zápalná energie je taktéž velmi nízká, což je výhodné při zážehu směsi ve spalovacím prostoru, ale zároveň velmi nebezpečné, pokud by ke vzplanutí došlo mimo spalovací prostor. Tato vlastnost byla podle mnohých historiků hlavní příčinou tragédie vzducholodi Hindenburg, ke které došlo 6. května 1937. Molekuly vodíku mají velmi malé rozměry, jejich viskozita je nízká. Proto jsou kladeny velké nároky na utěsnění celého systému používajícího vodík. Navíc je vodík bezbarvý a nezapáchající plyn, lidské smysly jeho únik nejsou schopné rozpoznat. Předpokládá se, že vodík bude uskladněn ve vozidle v nádobách za vysokého tlaku, konkrétně 35 – 70 MPa. Proto by při proražení nádrže hrozil velmi rychlý únik paliva s velmi vysokým nebezpečím výbuchu.

Na druhou stranu vodík má i mnoho vlastností, které jsou v případě havárie užitečné. Snadno se díky nízké hustotě rozptýlí, je mnohem lehčí než vzduch, a proto jeho plamen stoupá prudce vzhůru. V případě požáru vozidla se tedy tento odehrává především vně vozu. Doposud nebyly zaznamenány toxické účinky, a to ani při spalování.

### 1.3 Výroba vodíku

V současné době existuje několik způsobů, jak získat čistý vodík. Je nutné si uvědomit, jaké jsou aspekty výroby a jaká je její energetická náročnost. Při současném stavu, kdy je potřeba spotřebu energií celosvětově snížit, nesmí být výroba nového, byť ekologičtějšího paliva, výrazněji energeticky náročná. Používání takto vyrobeného vodíku by sice řešilo lokální ekologické problémy, nicméně globální ekologická zátěž pro planetu by byla mnohem vyšší. Jak ukazuje přehled na obrázku 1, v současné době je dominantní jeho výroba z fosilních paliv.



Obrázek 1 – Rozdělení světové produkce vodíku podle použitých zdrojů (Česká vodíková technologická platforma – [www.hytep.cz](http://www.hytep.cz), Petr Dlouhý, Markéta Somolová, 9.5.2007, [4])

Jelikož se ale pokoušíme vodíkem fosilní paliva nahradit, je toto řešení pro budoucnost nepřijatelné. Proto se usilovně hledají další metody, které by ropu, zemní plyn a

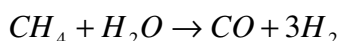
uhlí nahradily a zároveň by nebyly příliš energeticky náročné. Denní produkce vodíku se pohybuje zhruba kolem 127 000 tun.

### 1.3.1 Popis jednotlivých technologií výroby vodíku

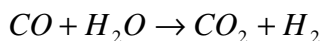
V současné době se jedná o nejrozšířenější výrobní procesy vodíku nebo o technologie, u nichž se v dohledné době předpokládá progresivní růst objemu vyrobeného vodíku.

#### 1) Parní reforming zemního plynu

Jedná se o nejrozšířenější a nejlevnější technologii výroby vodíku. Zemní plyn se spaluje a dodává teplo pro reformní reakci i pro konverzi oxidu uhelnatého (CO). Nejprve se přivádí metan (hlavní složka zemního plynu, chemická značka CH<sub>4</sub>) do vodní páry, která má teplotu 500 – 950°C a tlak 0,3 – 2,5 MPa. Reakcí páry a metanu vzniká vodík, oxid uhelnatý a malé množství oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>).



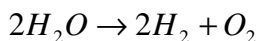
Dále následuje konverze oxidu uhelnatého s přiváděnou vodní párou, jeho přeměna na nejedovatý oxid uhličitý. Konverze probíhá již za nižší teploty.



Podle nejnovějších studií je také oxid uhličitý považován za skleníkový plyn a jeho emise se snaží vyspěle státy omezovat. Proto je tato metoda do budoucna pro hromadnou výrobu nepřijatelná. Účinnost procesu se pohybuje kolem 80%, je závislá především na poměru přiváděné páry a uhlíku obsaženého ve směsi.

#### 2) Elektrolytický rozklad vody

Proces štěpení chemické vazby mezi kyslíkem a vodíkem pomocí stejnosměrného proudu, který prochází vodným roztokem. Vodíkové kationy poté reagují na katodě a vznikající plyn je odváděn a skladován.



Pro výrobu je nutná pouze elektrická energie. Tato výroba může být vhodná jen v případě možnosti získání dostatečného množství ekologicky čisté elektrické energie. Takové možnosti má například Island nebo Norsko díky vhodným přírodním podmínkám. Účinnost procesu je velice vysoká, dosahuje až 92%. Je ovšem nutné započítat účinnost procesu získání elektrické energie.

Získaný vodík se pro většinu použití nemusí dodatečně čistit. Zařízení na výrobu mohou být různých rozměrů. Dají se použít pouze pro lokální výrobu, ale i jako velká centrální jednotka.

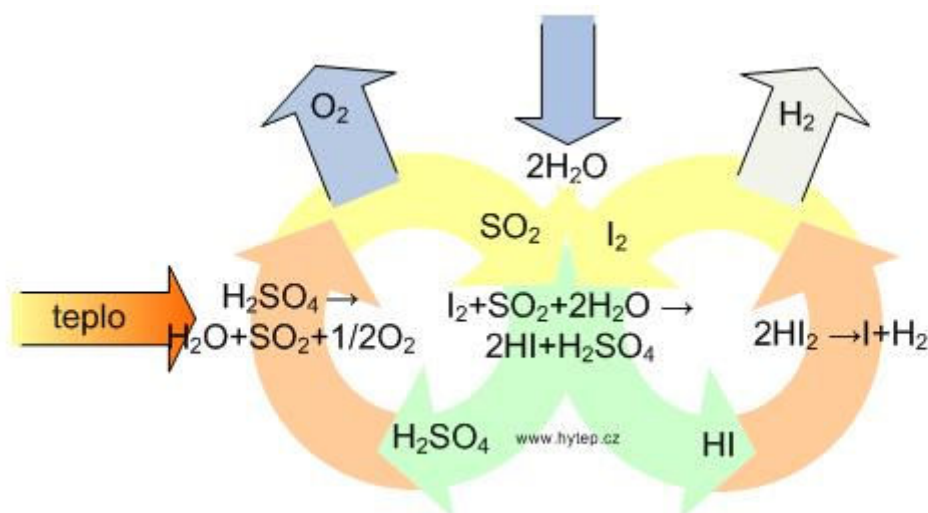
### 3) Vysokoteplotní elektrolýza

Princip je stejný jako u výše popsané technologie rozkladu vody pomocí elektrického proudu. Využívá se ovšem část energie ve formě tepla a to pomocí přivedené páry. Pára snižuje spotřebu elektrické energie, zvyšuje účinnost systému, díky cirkulaci složek  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{H}_2$  a  $\text{O}_2$  bez dalších příměsí je systém méně náchylný ke korozi. Nevýhodou je nutný předehřev páry, který opět vyžaduje jisté množství energie.

### 4) Termochemické cykly

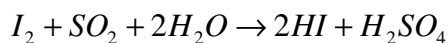
Technologie štěpení vody pomocí série chemických reakcí iniciovaných teplem je známa od dob první velké ropné krize. V té době se poprvé začalo uvažovat o nahrazení benzínu a nafty pro pohon vozidel. Cykly použité v této metodě jsou uzavřené. To znamená, že všechny použité chemické látky jsou znovu použity. Do systému se doplňuje pouze voda. Výslednými produkty jsou vodík a kyslík.

V 70. letech minulého století byl v institutu General Atomics (se sídlem v San Diegu, USA) vyvinut siřičito-jódový termochemický cyklus. Do budoucna by mohl být vhodnou technologií výroby vodíku při využití jaderné energie.



Obrázek 2 – Schéma výroby vodíku technologií siřičito-jódového termochemického cyklu (Česká vodíková technologická platforma – [www.hytep.cz](http://www.hytep.cz), Petr Dlouhý, Markéta Somolová, 9.5.2007, [4])

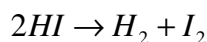
Prvním procesem je tzv. Bunsenova reakce, ve které reaguje voda s jódem a oxidem siřičitým. Vzniká při ní kyselina sírová a kyselina jodovodíková. Reakce je exotermická, odváděné teplo má teplotu zhruba 120°C.



Následuje endotermický rozklad kyseliny sírové. Pro optimální rozložení je nutná teplota 800 – 1000°C.



Současně s rozkladem kyseliny sírové dochází i k rozkladu kyseliny jodovodíkové. Tento endotermický proces vyžaduje teplotu nižší. Probíhá při teplotě okolo 300 – 450°C.



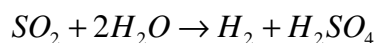
Vstupní suroviny jsou kapalné. Teoreticky by mělo docházet pouze k přivádění vody, ovšem v reálném procesu dochází ke ztrátám, a proto je nutné doplňovat i kyseliny. Do systému je třeba přivádět teplo, aby bylo možné rozštěpit kyseliny.

Celková účinnost procesu se vzhledem ke složitosti procesu posuzuje těžko. Při použití vyšších teplot účinnost stoupá, ovšem zvyšuje se riziko znečištění vodíku. Oproti elektrolýze nedochází ke ztrátám vznikajícím produkcí elektrické energie. Nevýhodou je nutnost vysoké vstupní teploty a také požadavek na použité materiály, které jsou extrémně chemicky namáhány působením kyseliny sírové a kyseliny jodovodíkové. Dalším problémem je poté kontrola průběhu reakce v podmínkách velkovýroby.

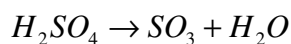
## 5) Hybridní termochemické cykly

Tato technologie výroby vodíku nabízí propojení elektrolýzy a termochemického cyklu. Díky využití elektrické energie se posouvají termochemické reakce do nižších teplot a produktem je vodík vyšší čistoty. Hybridní cyklus kyseliny sírové byl vyvinut v roce 1975 společností Westinghouse. Říká se mu tedy Westinghouse proces.

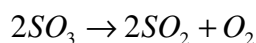
Vstupními surovinami jsou oxid siřičitý a voda. Pomocí elektrické energie vzniká vodík a dále kyselina sírová.



Pomocí endotermického rozkladu kyseliny sírové získáme vodu a oxid sírový. Teplota přivedeného roztoku se musí pohybovat okolo 450°C.



Nakonec se rozloží oxid sírový na vstupní oxid siřičitý a čistý kyslík. Proces probíhá při teplotách kolem 800°C.

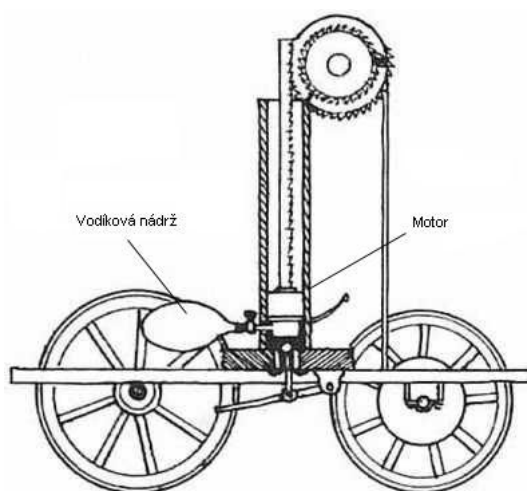


Díky využití termochemické reakce je spotřeba elektrické energie zhruba 3x – 4x nižší než v případě čistě elektrolytického rozkladu vody. Zůstává ovšem problém s odolností použitých materiálů proti agresivnímu působení kyseliny sírové. Účinnost cyklu se pohybuje kolem 40%, výhodou je jednoduchost procesu.

Pro zvolení vhodné technologie výroby vodíku jsou důležité lokální podmínky, v nichž se výroba nachází, požadavky poptávky a především zvážení investičních a provozních nákladů na výrobu. Elektrolytický rozklad vody se dá využít především v oblastech s dostatkem elektrické energie z obnovitelných zdrojů. Jedná se ale spíše o lokální výrobu. Pro velkokapacitní výrobu se lépe hodí využití termochemických cyklů. Počítá se totiž, že výroba vodíku by mohla využívat část tepla získaného ochlazováním jaderných reaktorů. Dále se dá výroba vodíku využít jako vhodný regulátor při výrobě elektrické energie.

## 1.4 Historie využití vodíku k pohonu vozidel

Prvním vozidlem na světě, který ke svému pohonu využíval vodík, byl prototyp, jehož autorem byl Francois Isaac de Rivaz. Vůz spatřil světlo světa roku 1807. Nákres je na obrázku 3.



Obrázek 3 – Francois Isaac de Rivaz – nákres prototypu (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 18.11.2007, [5])

Následovala zhruba padesátiletá pauza, než se objevil ve Francii jiný vůz. Využíval elektrolytického rozkladu vody a následně pohon vodíkem. Vozidlo proto neslo název Hippomobile a jeho autorem byl Etienne Lenoir.

Vodík se poté opět odmlčel. Svět měl jiné starosti. V roce 1941 sice vznikl v Rusku koncept vodíkového vozu, ale jeho další vývoj ukončila invaze německých vojsk téhož roku.

Všechny doposud uvedené vozy spalovaly vodík přímo. Jako první vůz využívající palivové články byl představen v roce 1967 van od společnosti GM. Byl využíván pouze interně, protože výdrž jeho článků byla jen 1000 hodin. V sedmdesátých letech následovalo několik prototypů od společnosti Musashi se sídlem v Japonsku. Vozy opět spalovaly vodík a firma pokračovala ve vývoji až do devadesátých let. Celkem se jí do roku 1997 podařilo představit deset vozů, včetně jednoho malého nákladního automobilu. V osmdesátých letech se vývojem vodíkového pohonu začala zabývat i automobilka BMW, která postupně dodala čtyři prototypy na bázi svého největšího sedanu, řady 7, a před nimi model 520h. Na konci let osmdesátých se světu představily i první prototypy stuttgartské automobilky Mercedes-Benz. V devadesátých letech začala s vývojem i japonská Mazda. Zůstalo pouze u konceptů představených na Tokyo Motor Show v letech 1991 a 1993.

Devadesátá léta představovala ohromný počet prototypů vozidel využívajících palivové články. Za pozornost stojí především první modely vozů Toyota FCVH a Honda FCX. Následovaly různé další typy, například pokus firmy Zevco, která představila londýnský taxivůz s pohonem palivovými články. Své vozy představily i další značky. Namátkou Nissan, Mitsubishi nebo Daihatsu. Koncern GM představil velké množství vozů, které měly několik vývojových stupňů. Některé vozy upadly v zapomnění, jiné se přenesly do nového tisíciletí a zasluhují pozornost.

## **1.4.1 Vozidla spalující vodík přímo v motoru**

### **1.4.1.1 BMW**

Bavorská automobilka začala psát své vodíkové kapitoly v roce 1979, kdy světu ukázala model 520h. Následovaly čtyři vývojové generace vozu řady 7. Vozy mohly spalovat jak vodík, který byl uschováván v kapalném stavu, tak i benzin. Kapacita nádrží postupem času rostla, dojezd dosáhl až na 300 km.





*Obrázek 4 – BMW řady 7 – čtyři generace vozu s vodíkovým pohonem (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 18.11.2007, [5])*

Další vývojový skok znamenal rok 1999, kdy měla limuzína řady 7 s dvoupalivovým motorem dojezd 900 km, přičemž 300 km byla schopna jet na vodík. Motor V12 o objemu 5,4 l dával výkon 150 kW a disponoval kroutícím momentem 300 Nm při 4500 otáčkách. Hodnoty maximální rychlosti (226 km/h) a zrychlení z 0 na 100 km/h (za 9,6 sec) byly velice dobré.

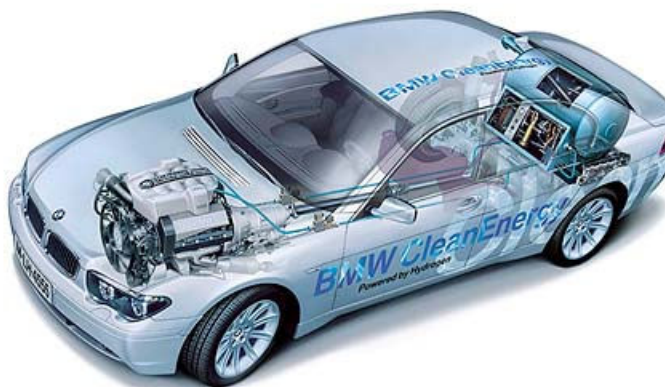


*Obrázek 5 – BMW řady 7 – model z roku 1999 s vodíkovým pohonem (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 18.11.2007, [5])*

V roce 2001 následovalo zmenšení celého systému a jeho aplikace s motorem 4,4 l V8, který byl naladěn na výkon 135 kW. Nádrž byla menší, nicméně dojezdová vzdálenost vzrostla o 50 km. Vodíkový pohon byl také aplikován do vozu Mini Cooper patřícího do skupiny BMW Group.

Velký úspěch zaznamenali inženýři BMW se závodním vozem H2R. Podařilo se jim vytvořit celkem devět rekordů. Vůz byl poháněn vidlicovým dvanáctiválcem s výkonem 210 kW, jako palivo byl použit kapalný vodík.

Posledním počinem bylo představení vylepšeného sedanu řady 7 s pohonem na kapalný vodík nesoucí označení Hydrogen7. Vůz byl představen světu v listopadu 2006. Jedná se o malosériovou produkci, kterou využívají především ekologicky smýšlející vládní představitelé, neboť firma si za vůz účtuje cenu zhruba milion Euro. Navíc vůz nabízí pouze formou pronájmu.



Obrázek 6 – BMW řady 7 – schéma modelu z roku 2001 s vodíkovým pohonem (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 18.11.2007, [5])

#### **Technické parametry vozu BMW Hydrogen 7:**

- vůz odvozen od BMW 760 i a BMW 760 Li
- motor: vidlicový dvanáctiválec s výkonem 191 kW s možností spalování benzinu a vodíku
- vodík je uskladněn v kapalném stavu v nádrži umístěné za zadní nápravou, částečně zasahuje do kufru
- dojezd: 700 km (200 km s vodíkovým pohonem), spotřeba vodíku odpovídá spotřebě 13,3 l benzinu na 100 km
- emise: 5g CO<sub>2</sub> na 100 km jízdy při provozu na vodík



Obrázek 7 – BMW Hydrogen7 – pohled na zavazadlový prostor s nádrží na kapalný vodík (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH, 18.11.2007, [5])

### 1.4.1.2 FORD

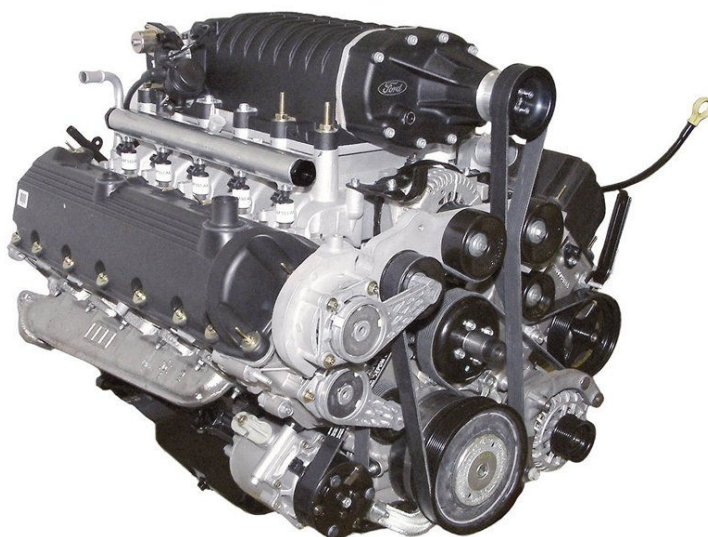
Jako jeden z největších výrobců automobilů cítí Ford povinnost zapojit se také do vývoje ekologicky šetrného vozu. Fordu se podařilo vyvinout motor přímo spalující vodík, který je připraven pro sériovou produkci. Zatím ovšem chybí vůz, do kterého by mohl být aplikován. Nejnadějněji vypadal projekt velkého mikrobuse E-450. Tento projekt byl zastaven a jeho další vývoj je nejasný.



Obrázek 8 – Ford E-450 (internetový magazín o automobilech – [www.auto.cz](http://www.auto.cz), Ondřej Láník, 20.7.2006, [12])

#### Technické parametry motoru Ford V10:

- vidlicový desetiválec s úhlem mezi válci  $90^\circ$  o objemu 6751 ccm
- výkon 173 kW při 4000 ot/min, točivý moment 427 Nm při 3000 ot/min
- litinový blok, hliníková hlava válců, dva ventily na válec, upravený klikový mechanismus, vytvrzená sedla ventilů



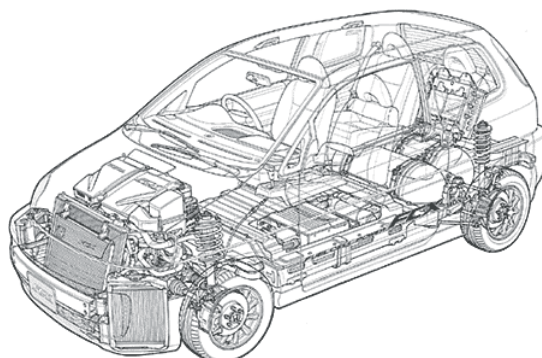
Obrázek 9 – Ford – motor V10 uzpůsobený pro sériovou výrobu (internetový magazín o automobilech – [www.auto.cz](http://www.auto.cz), Ondřej Láník, 20.7.2006, [12])

Ford se ovšem zabývá i druhou vývojovou linií a přestavěl několik svých modelů na palivové články.

## 1.4.2 Vozidla využívající palivové články

### 1.4.2.1 HONDA

Japonská Honda se prezentuje na širokém poli působnosti, ať se jedná o automobily, motocykly, lodní motory, ale třeba i zahradní techniku či její projekt robota ASIMO. Vždy se vyznačuje špičkovou technologií. Využívá spolupráce s předními japonskými producenty elektroniky. Možná právě proto se Honda rozhodla u svého ekologického vozu jít cestou pohonu elektromotoru pomocí palivových článků. Využití tohoto zdroje energie není u Hondy omezeno pouze pro automobily, ale byl představen i skútr o objemu 125 ccm. Jako stěžejní projekt funguje model FCX.



Obrázek 10 – Honda FCX – schéma uložení jednotlivých součástí (Honda Motor Co., Ltd. – [www.world.honda.com](http://www.world.honda.com), 19.11.2007, [8])

Jeho vývoj byl odstartován v roce 1999, kdy Honda představila první koncept FCX-V1 na Tokyo Motor Show. Následoval další, vylepšený model FCX-V2. Tyto modely využívaly vodíku přeměnou z methanolu. FCX-V3 byl již vybaven nádrží na stlačený vodík. Model FCX-V4 zvýšil jeho tlak v nádrží na 35 MPa a dosáhl tedy větší dojezdové vzdálenosti. Zmenšením celého zařízení byla u modelu FCX zvýšena kapacita zavazadlového prostoru na 102 l, vylepšily se rovněž dynamické vlastnosti vozu (zvýšení točivého momentu, vyšší maximální rychlost) a dojezd. Pro porovnání jsou parametry jednotlivých modelů uvedeny v tabulce 2.

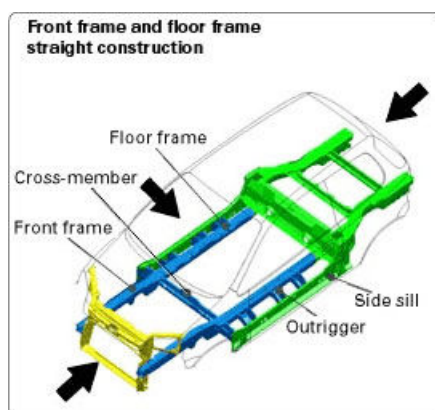
Protože se jednalo o vývoj zcela nového vozu, který konstrukčně nevychází ze žádného sériového modelu Honda, navrhli konstruktéři nový podvozek a rám tak, aby byly co možná nejlépe ochráněny vodíkové nádrže a palivové články. Do tohoto rámu byly zakomponovány všechny důležité komponenty. Rám se skládá ze tří částí. Střední část je tvořena podlahovým rámem (Floor frame), ke kterému jsou přes nástavce (Outtrigger) připojeny prahy (Side sill). Přední část (Front frame) je ke středovému dílu připojena pomocí



dvojice vzpěr. Tuhost rámu proti bočnímu namáhání zajišťují příčky (Cross-member). Celý systém je na obrázku 11.

	<b>FCX-V1</b>	<b>FCX-V2</b>	<b>FCX-V3/V3 s palivovými články Honda</b>	<b>FCX-V4</b>	<b>FCX</b>
Zásobník vodíku	Nádrž z kovové slitiny absorbující vodík	Reformátor methanolu	Vysokotlaké nádrže na vodík (25 MPa)	Vysokotlaké nádrže na vodík (35 MPa)	Vysokotlaké nádrže na vodík (35 MPa)
Kapacita zásobníku vodíku	-	-	100 l	137 l	156,6 l
Druh palivových článků	PEFC (palivové články s polymerovým elektrolytem)	Honda PEFC (palivové články s polymerovým elektrolytem)	PEFC/Honda PEFC (palivové články s polymerovým elektrolytem)	PEFC (palivové články s polymerovým elektrolytem)	PEFC (palivové články s polymerovým elektrolytem)
Pomocný pohon	Baterie	Baterie	Kondenzátor	Kondenzátor	Kondenzátor
Motor, max. výkon Motor, max. točivý moment	49 kW -	49 kW -	60 kW 238 Nm	60 kW 238 Nm	60 kW 272 Nm
Maximální rychlost [km/h]	-	-	130	140	150
Jízdní dosah [km]	-	-	180	315	355

Tabulka 2 – Porovnání jednotlivých vývojových řad modelu FCX – v původním anglickém znění (Honda Motor Co., Ltd. – [www.world.honda.com](http://www.world.honda.com), 19.11.2007, [8])



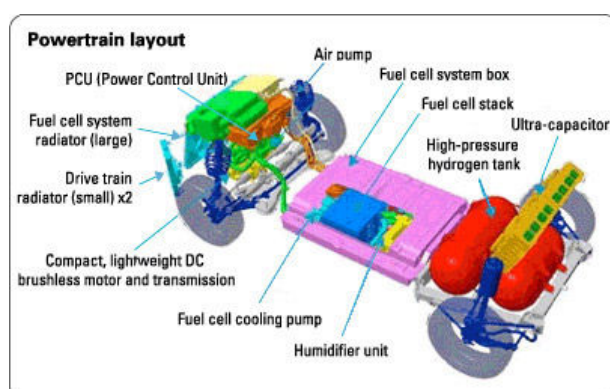
Obrázek 11 – Honda FCX – rám – v původním anglickém znění (Honda Motor Co., Ltd. – [www.world.honda.com](http://www.world.honda.com), 19.11.2007, [8])

Dvě palivové nádrže na vodík jsou umístěny před a za zadní nápravou. Detailní pohled je na obrázku 14. Zespolu jsou nádrže chráněny doplňkovým rámem (Rear sub-frame). Nad nimi je umístěn kondenzátor (Ultra-capacitor), který dodává vozu potřebnou dynamiku při

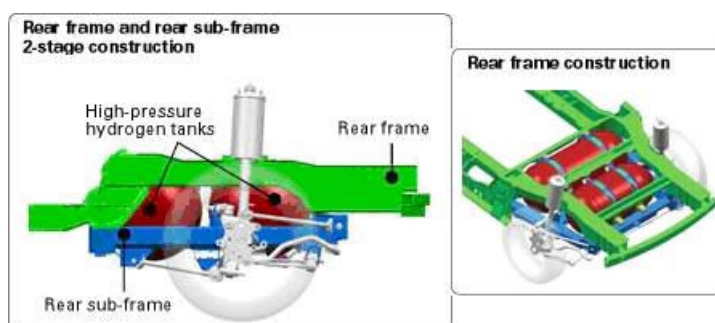
rozjezdu. V podlaze se nachází systém s palivovými články (Fuel cell systém box) obsahující kromě vlastních palivových článků ještě čerpadlo (Fuel cell cooling pump) pro přísun chladicí kapaliny od chladiče (Fuel cell system radiator) k článkům a jednotku zvlhčovače (Humidifier unit). Motor na stejnosměrný proud a převodovka jsou umístěny vpředu (DC brushless motor and transmission), poháněna jsou přední kola. Nad motorem je umístěna řídicí jednotka (PCU). Motor je chlazen dvojicí menších chladičů (Drive train radiator). Vyobrazení umístění zmiňovaných komponentů je na obrázku 13.



Obrázek 12 – Honda FCX – zabudování komponentů pro pohon do rámu, detail zástavby nádrží na vodík (Honda Motor Co., Ltd. – [www.world.honda.com](http://www.world.honda.com), 19.11.2007, [8])



Obrázek 13 – Honda FCX – schéma umístění jednotlivých částí pohonu – v původním anglickém znění (Honda Motor Co., Ltd. – [www.world.honda.com](http://www.world.honda.com), 19.11.2007, [8])



Obrázek 14 – Honda FCX – detailní pohled na uložení nádrží – v původním anglickém znění (Honda Motor Co., Ltd. – [www.world.honda.com](http://www.world.honda.com), 19.11.2007, [8])

V roce 2005 představila Honda nový koncept FCX. Jedná se o sedan střední třídy. Tento provozuschopný vůz absolvoval 25.7.2007 jízdní testy ve Švédsku za účasti novinářů

z celé Evropy. Mimo jiné se jich zúčastnil i novinářský tým MF Dnes a jejich článek je veřejně přístupný na internetové adrese:

[http://auto.idnes.cz/na-vlastni-kuzi-jizda-autem-kteremu-jde-z-vyfuku-jen-para-pe6-/auto\\_testy.asp?c=A070724\\_144737\\_auto\\_testy\\_fdv](http://auto.idnes.cz/na-vlastni-kuzi-jizda-autem-kteremu-jde-z-vyfuku-jen-para-pe6-/auto_testy.asp?c=A070724_144737_auto_testy_fdv)



*Obrázek 15 – Honda FCX – koncept představený v roce 2005 (Honda Motor Co., Ltd. – [www.world.honda.com](http://www.world.honda.com), 19.11.2007, [8])*

Vůz je vybaven inovovaným podvozkem, do něhož je zabudovaný systém palivových článků. Nádrže na vodík jsou opět v zadní části vozu. Podvozek osazený pohonným ústrojím je na obrázku 16.



*Obrázek 16 – Honda FCX – podvozek V Flow (Honda Motor Co., Ltd. – [www.world.honda.com](http://www.world.honda.com), 19.11.2007, [8])*

Nádrže jsou konstruovány pro tlak 35 MPa, jejich objem činí 171 litrů. Detailní obrázek nádrží je vložen jako číslo 17.



Obrázek 17 – Honda FCX – detailní pohled na vodíkové nádrže (Honda Motor Co., Ltd. – [www.world.honda.com](http://www.world.honda.com), 19.11.2007, [8])

Letos byla na výstavě v Los Angeles (USA) prezentována sériová podoba. Vůz ponese název Clarity, což v překladu znamená Čistá, Jasná nebo Průzračná. Oproti konceptu dostal vůz střídmeji pojatý interiér, drobné změny doznal i exteriér a podařilo se opět navýšit výkon, tentokrát o 5 kW. Parametry vozu uvedené v tabulce 3 se podle vyjádření Hondy mohou lišit podle specifických legislativních požadavků tak, aby vyhověly všem požadovaným zkouškám a vůz získal potřebná osvědčení nutná k provozu.

HONDA FCX Clarity		
Motor	Typ motoru	střídavý synchronní elektromotor
	Maximální výkon [kW]	100
	Nejvyšší točivý moment [Nm]	256
Palivové články	Druh	PEMFC – palivové články s membránou propouštějící protony
	Maximální výkon [kW]	100
Palivo	Druh paliva	stlačený vodík
	Ukládání	vysokotlaké vodíkové nádrže (35 MPa)
	Kapacita nádrží [l]	171
Rozměry (délka x šířka x výška) [mm]		4835 x 1835 x 1470
Hmotnost vozu [kg]		1625
Nejvyšší rychlost [km/h]		160
Zásobník energie		Lithium iontové baterie
Počet míst k sezení		4

Tabulka 3 – Parametry vozu Honda FCX Clarity – (Honda Motor Co., Ltd. – [www.hondanews.eu](http://www.hondanews.eu), 19.11.2007, [8])

Společnost Honda také představila systém pro výrobu vodíku, který si nechala patentovat. Výroba probíhá pomocí spalování zemního plynu. Zároveň ovšem ohřívá majiteli stanice vodu v domě a dodává elektrickou energii. Fotografie stanice je na obrázku 20.





Obrázek 18 – Honda FCX Clarity – podoba vozu určeného pro sériovou výrobu (Honda Motor Co., Ltd. – [www.world.honda.com](http://www.world.honda.com), 19.11.2007, [8])



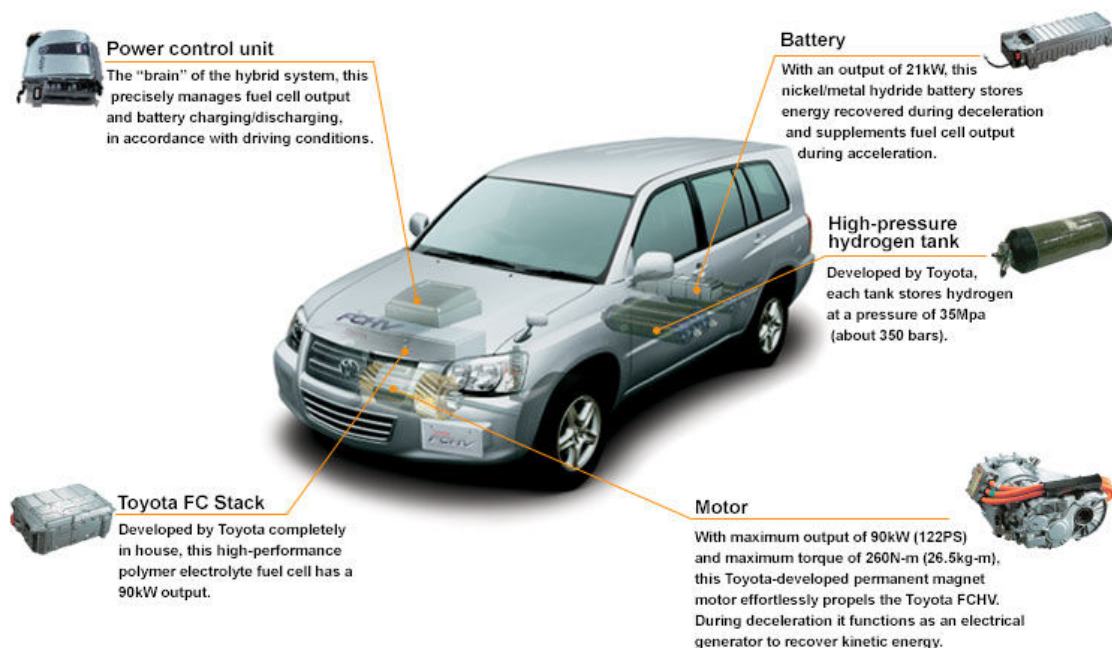
Obrázek 19 – Honda FCX Clarity – tankování vodíku (Honda Motor Co., Ltd. – [www.world.honda.com](http://www.world.honda.com), 19.11.2007, [8])



Obrázek 20 – Honda FCX Clarity – domácí čerpací stanice (Honda Motor Co., Ltd. – [www.world.honda.com](http://www.world.honda.com), 19.11.2007, [8])

### 1.4.2.2 TOYOTA

Momentálně největší automobilka světa se na poli vozů s vodíkovým pohonem prezentuje s modelem FCHV. Jako „předskokan“ ve světě ekologických vozů byl Toyotou uveden hybridní model Prius. Těší se ohromnému prodejnímu úspěchu, který předčil veškerá očekávání značky. Model FCHV by měl pokračovat v jeho stopách.



Obrázek 21 – Toyota FCHV – umístění jednotlivých součástí pohonu – v původním anglickém znění (Toyota Motor Corporation – [www.toyota.co.jp](http://www.toyota.co.jp), 20.11.2007, [9])

Celý systém pohonu je hodně podobný výše uvedenému modelu Honda FCX. Vysokotlaké nádrže (High-pressure hydrogen tank) s vodíkem o tlaku 35 MPa jsou umístěny v zadní části vozu. Toyota nevyužívá kondenzátoru, ale lepší akceleraci vozu pomáhají baterie (Battery). Jsou schopné dodávat výkon 21 kW. Během decelerace se dobíjí. Palivové články (Toyota FC Stack) umístili konstruktéři do míst, kde se běžně nachází motor. Vzhledem k malým rozměrům elektromotoru o výkonu 90 kW se do prostoru pod přední kapotu vejde i řídicí centrum pohonu (Power control unit).



Position of the high-pressure hydrogen tanks

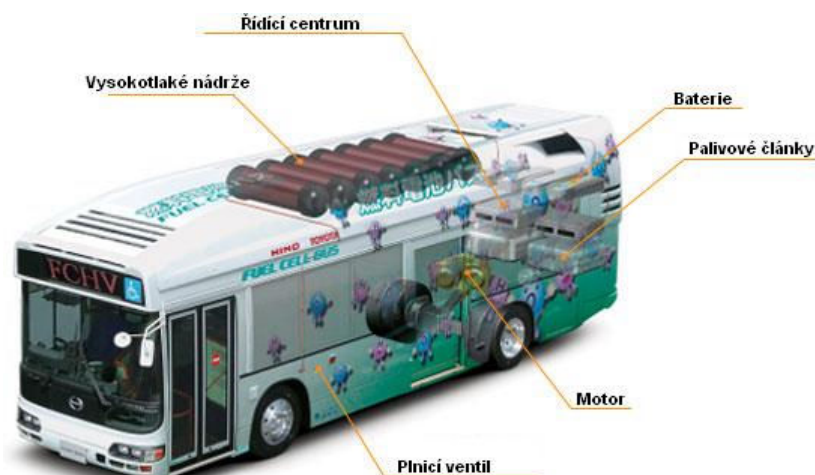
Obrázek 22 – Toyota FCHV – umístění nádrží v podvozku (Toyota Motor Corporation – [www.toyota.co.jp](http://www.toyota.co.jp), 20.11.2007, [9])

Nádrže na vodíky si vyvinula Toyota sama. Jejich kapacita dodává vozu vodík na dojezd přes 300 km. Specifikace vozu a jízdní výkony vozu jsou v tabulce 4.

TOYOTA FCHV		
Motor	Typ motoru	elektromotor s permanentním magnetem
	Maximální výkon [kW]	90
	Nejvyšší točivý moment [Nm]	260
Palivové články	Druh	TOYOTA FC Stack – palivové články s polymerovým elektrolytem vlastní výroby
	Maximální výkon [kW]	90
Palivo	Druh paliva	stlačený vodík
	Uskladnění	vysokotlaké vodíkové nádrže (35 MPa)
Rozměry (délka x šířka x výška) [mm]		4735 x 1815 x 1685
Hmotnost vozu [kg]		1880
Nejvyšší rychlost [km/h]		155
Jízdní dosah [km]		330
Zásobník energie		NiMH baterie (nikl-metal hydridové)
Počet míst k sezení		5

Tabulka 4 – specifikace a jízdní výkony vozu Toyota FCVH – (Toyota Motor Corporation – [www.toyota.co.jp](http://www.toyota.co.jp), 20.11.2007, [9])

Využití vodíkového pohonu se také uplatnilo například u koncernové značky Hino, která dodala autobusy s vodíkovým pohonem pro provoz na letišti Centrair (Central Japan International Airport), které je hlavním dopravním uzlem v prefektuře Aichi. Toyota dodává na toto letiště i vozy FCHV. Slouží zde u společnosti Yamato Transport jako dodávková vozidla. Jsou pouze dvoumístná, zbytek vozu je využit k přepravě zásilek o hmotnosti až 150 kg mezi letištěm a městem Nagoja.



Obrázek 23 – Hino FCHV-bus – umístění jednotlivých součástí pohonu (Toyota Motor Corporation – [www.toyota.co.jp](http://www.toyota.co.jp), 20.11.2007, [9])

### 1.4.2.3 GENERAL MOTORS

Americký koncern GM se jakožto donedávna největší výrobce automobilů také zaměřil na pohon pomocí palivových článků. Jeho první experiment se datuje do roku 1967, kdy světu představil van s pohonem na palivové články. Následovaly další vozy. Vzhledem k tomu, že se jedná o koncern skládající se z mnoha značek, byly jednotlivé studie představeny pod různými jmény.

Za pozornost stojí vývojová řada počínající modelem Hydrogen 3. Ještě před ní se představily futuristické koncepty AUTOnomy a Hy-wire. Model Hydrogen 3 byl aplikován na stávající automobil Opel Zafira. Vodík pro palivové články mohl být skladován jako kapalný při teplotě  $-253^{\circ}\text{C}$  nebo jako plyn, jehož tlak mohl být až 70 MPa. Akční rádius vozu činil při využití zkapalněného vodíku 400 km. Při natankování vodíku v plynném stavu mohlo vozidlo ujet 270 km.



Obrázek 24 – GM Hydrogen 3 – aplikace vodíkového pohonu do vozu Opel Zafira (General Motors Corporation – [www.gm.com](http://www.gm.com), 20.11.2007, [10])

Jeho nástupcem byl Chevrolet Equinox. Jedná se o klasické vozidlo z americké produkce. Automobil se řadí do kategorie SUV, ovšem pouze s pohonem předních kol. I ve čtyřmístném provedení disponuje vozidlo úctyhodným zavazadlovým prostorem.





Obrázek 25 – Chevrolet Equinox (General Motors Corporation – [www.gm.com](http://www.gm.com), 20.11.2007, [10])

Následným produktem je pak model Sequel produkovaný pod koncernovou značkou Chevrolet. Umístění jednotlivých komponentů vodíkového pohonu je na obrázcích 26 a 27. Vozidlo je koncepčně blízké sériově vyráběnému modelu Cadillac SRX. Jeho nádrže (Hydrogen storage tanks) nejsou umístěny kolem zadní nápravy, ale v podélném směru přímo pod sedadly. Vedle nádrží se nachází řídicí jednotky (By-Wire system). Palivové články (Fuel cell stack) jsou uloženy za přední nápravou, před nimi je elektromotor (Front electric engine) pohánějící přední kola. Zadní kola pohání dvojice menších motorů (Wheel hub motor) zabudovaných v kolech. Nad zadní nápravou má své místo zásobník energie v podobě Lithium-iontové baterie (Lithium-ion battery).



Obrázek 26 – Chevrolet Sequel – schéma umístění jednotlivých částí vodíkového pohonu (General Motors Corporation – [www.gm.com](http://www.gm.com), 20.11.2007, [10])



Obrázek 27 – Chevrolet Sequel – popis jednotlivých částí vodíkového pohonu – v původním anglickém znění (General Motors Corporation – [www.gm.com](http://www.gm.com), 20.11.2007, [10])

Dalším počinem koncernu GM na poli vodíkových vozidel je koncept Chevrolet Volt. Podvozek je podobné koncepce jako V Flow systém od Hondy.

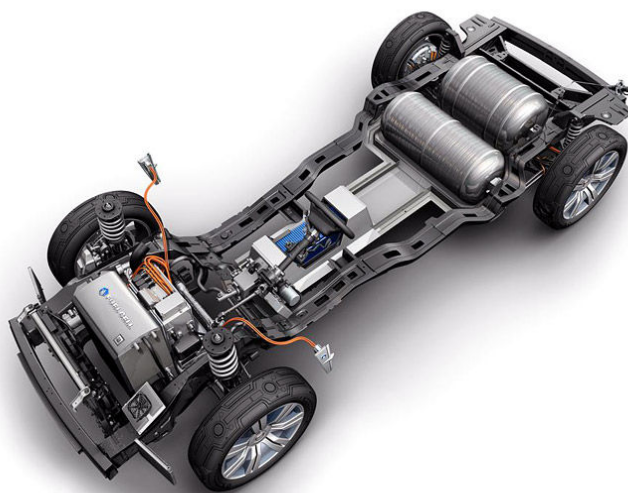


Obrázek 28 – Chevrolet Volt – podvozek a umístění jednotlivých částí vodíkového pohonu (General Motors Corporation – [www.gm.com](http://www.gm.com), 20.11.2007, [10])

Nejnovější vůz s vodíkovým pohonem od společnosti GM je Cadillac Provoq představený na začátku ledna 2008. Jedná se o pětimístný vůz s pohonem 4x4. Přední náprava je poháněna energií z palivových článků. Na kola se přenáší výkon 70 kW. Kola na zadní nápravě pohání elektromotory, které jsou schopny dodat výkon 40 kW. Dojezd vozu je až 483 km, z toho 450 km je pomocí vodíku a 33 km je na bateriový pohon. Vůz využívá nejmodernější tlakové nádoby s tlakem 70 MPa. Podvozek vychází z předchozího modelu Volt.



*Obrázek 29 – Cadillac Provoq – řez vozem, (internetový magazín o automobilech – [www.auto.cz](http://www.auto.cz), Ondřej Pavlůšek, 8.1.2008, [10])*



*Obrázek 30 – Cadillac Provoq – podvozek a umístění jednotlivých částí vodíkového pohonu (internetový magazín o automobilech – [www.auto.cz](http://www.auto.cz), Ondřej Pavlůšek, 8.1.2008, [10])*

Rešeršní práce byla uzavřena k 10.1.2008. Vzhledem k velkému vývoji během posledních dvou let předpokládám, že v dalších měsících budou představeny další vozy využívající k pohonu vodík.

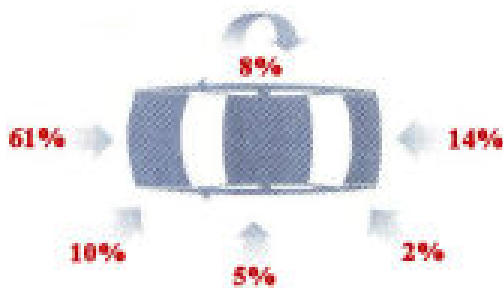
## 2 Vhodné alternativy pro uskladnění stlačeného vodíku ve vozidle

### 2.1 Všeobecné podmínky pro uskladnění

Skladování vodíku ve vozidle musí splňovat jistá bezpečnostní opatření. Musí být zajištěna především ochrana proti proražení nádrží, dále ochrana proti nadměrnému zatížení nádrží, a to jak tlakovému, tak i teplotnímu. Musí být též zajištěna ochrana proti úniku náplně, tj. vozidlo musí být vybaveno stabilními a dostatečně ukotvenými prvky pro vedení paliva, kvalitními ventily. Pokud možno, musí být vedení vyrobeno z takových materiálů, aby odolávalo nepříznivým podmínkám, nemohlo být poškozeno živočichy, jako jsou například kuny a lasičky. Pokud tomu tak není, mělo by být dodatečně chráněno. U vozidel s vodíkovým pohonem vycházejících ze stávající produkce, tedy odvozených od současných sériových vozů, by mělo navíc docházet k co možná nejmenším úpravám a odlišnostem od již vyráběného vozu. Tento důvod je ovšem především ekonomický, protože využitím dílů od stávajících dodavatelů a již zpracované logistiky lze ušetřit výrobní náklady. Velkou část montáže vozu s vodíkovým pohonem lze vykonat na nynějších výrobních linkách za využití stávajících dílů a náradí.

### 2.2 Alternativy umístění nádrží na stlačený plyn ve voze

Při aplikaci pohonu stlačeným plynem do již vyráběného modelu vozu existuje několik vhodných variant s ohledem na konkrétní požadavky. Z hlediska bezpečnosti je nutné umístění nádrží do té části vozu, která je co možná nejméně deformována při případné havárii.



Obrázek 31 – Četnost výskytu nehod na jednotlivých částech vozu (Ing. Petr Skalák – Přednáška o pasivní bezpečnosti vozidel, 28.11.2006, [13])

Na obrázku 31 je zobrazena četnost výskytu nehod na jednotlivých částech vozu. Z tohoto pohledu se jeví jako ideální umístění nádrží do zadní části vozu. Při předpokladu



střetu je toto místo nejméně deformované. V dnešní době je tedy standardem umístění klasické nádrže pod zadní sedadla, zpravidla vpravo, kde je chráněna zadní nápravou.

Na rozdíl od nádrží na benzin nebo naftu musí nádrž na vodík odolávat značnému přetlaku. Tvar nádrží tak nemůže být libovolný, ale využije se vhodných vlastností válcové nádoby, která danému zatížení odolává nejlépe. Nevznikají v ní totiž žádné koncentrace napětí. Hodnota maximálního tlaku v nádrži je závislá na schopnostech tankovacího zařízení a na schopnostech nádrže takovému tlaku odolat. Jediná vodíková čerpací stanice na území České republiky, kterou plánuje postavit firma Linde Gas a.s. v Neratovicích, bude schopna podle vyjádření společnosti tankovat vodík až do tlaku 30 MPa. Dnešní moderní materiály ovšem dovolují výrobu tlakových nádob použitelných až do 70 MPa. Podobně jako například u nádrží na CNG, je objem palivových nádrží větší než benzinová nádrž. Jejich objem vychází z požadované dojezdové vzdálenosti při použití konkrétní pohonné jednotky. Je zřejmé, že větším plnicím tlakem dochází k navýšení množství paliva v nádrži, a ta tak může být pro stejnou dojezdovou vzdálenost menší a lehčí.

Důležitým faktorem pro vhodné umístění nádrží je druh pohonu. Je nutné ujasnit, zda má být vozidlo poháněno čistě vodíkem, nebo zda-li má být ve voze dvoupalivový motor, který by byl schopný spalovat jak benzin, tak i vodík, jako například BMW řady 7. Důležitým ukazatelem je především dojezdová vzdálenost ve vztahu k hustotě sítě čerpacích stanic. V dnešní době se dojezdová vzdálenost pohybuje zhruba od 500 do 1000 kilometrů, ale moderní vozy s dieslovým motorem hranici tisíce kilometrů překonávají. Pro vodíkový pohon se jeví jako reálná hranice 300 km, kterou většinou uvedené projekty splňují.

V případě čistě vodíkového pohonu není nutné zachovat benzinovou nádrž. Po jejím odstranění tak vznikne prostor pod podlahou vozu, do kterého se dají umístit vodíkové nádrže. Jejich velikost záleží na konkrétní podobě podvozku. Pro mnoho vozů by byl objem nádrží nedostatečný. Proto je nutné provést další konstrukční úpravy. Většina vozidel je standardně vybavena rezervním kolem. Nabízí se možnost nahradit rezervní kolo sadou na opravu pneumatik a tím získat další volné místo. V rámci maximálního možného využití prostoru je vhodné propojit s místem původního umístění benzinové nádrže a zajistit tak kompaktní prostor. Nádrže pak mohou být objemnější a proti většímu počtu malých nádrží by takové řešení vycházelo výrazně levněji.

Při požadavku dvoupalivového motoru je nutné zachovat nádrž pro benzin. Je otázkou, v jakém poměru se požaduje zastoupení obou druhů paliva, neboť právě tento poměr rozhoduje o velikosti nádrží. Pro případ využití vodíku jen jako doplňkového paliva se uplatní umístění nádrže na vodík do zavazadlového prostoru. Toto řešení se používá například u

některých vozidel s pohonem na CNG. Vzhledem k mnohem vyšším cenovým nárokům je využití vodíku jako pouhého doplňkového paliva značně nerentabilní. Uplatnění bych tedy viděl spíše ve zmenšení benzinové nádrže, která by po té sloužila jako dojezdová rezerva. Při předpokládané spotřebě 7 – 10 litrů benzínu na 100 km jízdy by její objem mohl být do 20 litrů. Vozidlo by pak bylo schopno ujet cca 200 km s pohonem na benzin.

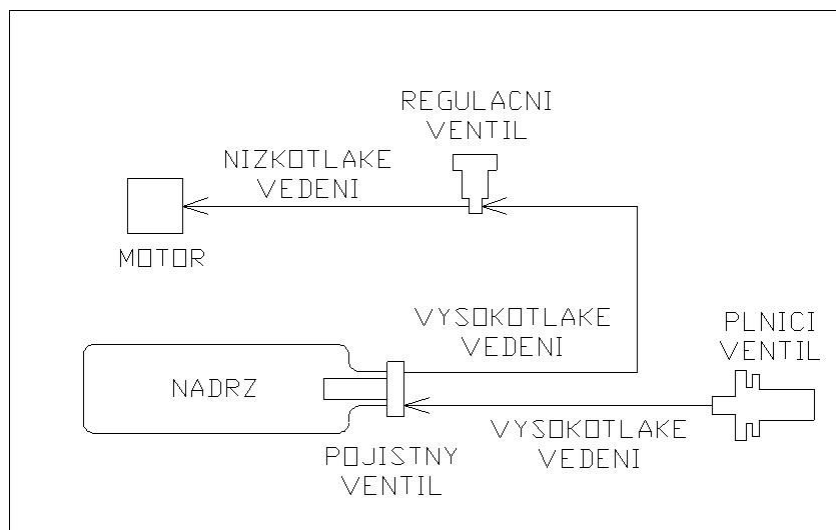
Další důležitý požadavek je charakter využití vozu. Pokud je primárním určením přeprava osob bez ohledu na zavazadla, je zřejmé, že nádrže se dají umístit do zavazadlového prostoru a konstrukční nároky na přestavbu vozu nebudou nijak velké. V případě, že na vůz jsou kladeny nároky na maximální možný ložný prostor, bude vhodné nádrže umístit pod podlahu vozu. Předpokládám, že takový vůz bude většinou pouze dvoumístný. Ložný prostor by měl mít rovnou podlahu. Vhodně umístěné nádrže pod podlahou tyto nároky nenaruší. Stejně tak i v případě osobních vozů, kdy je nutné zachovat jak stávající počet míst pro pasažéry, tak i zavazadlový prostor.

## **2.3 Palivový systém**

Plynná paliva vyžadují specifický palivový systém. Jak již bylo uvedeno v kapitole 1.2 (Základní vlastnosti vodíku), je hustota energie obsažená ve vodíku mnohem nižší než u benzínu a využívá se jeho stlačitelnosti, která umožní skladovat větší množství plynu se značným přetlakem v tlakových nádobách. Pro potřeby této diplomové práce a snadnější orientaci budou prvky označovány podle velikosti pracovního tlaku.

- a) nízkotlaké – pracující s tlakem menším než 25 MPa
- b) prvky pracující se středně velkým tlakem – tlak o velikost 25 až 35 MPa
- c) vysokotlaké – pracující s tlakem vyšším než 35 MPa

Zavedení paliva do vozu umožňuje plnicí ventil, ke kterému se připojí tankovací zařízení zakončené tankovací pistolí. Vedení do nádrží je vysokotlaké. Musí být dimenzované s ohledem na maximální přípustný tlak v nádržích. Nádrže jsou chráněny proti přetlaku pojistnými ventily. Požadovaný tlak na vstupu do motoru zajišťuje regulační ventil. Umisťuje se do motorového prostoru. Vedení od nádrží k motoru pracuje v porovnání s vedením od plnicího ventilu do nádrží s nižším tlakem. Skládá se ze dvou částí. První část vede od nádrží k regulátoru tlaku. Pracuje s vyšším tlakem, který je odvozen regulací prováděnou ventilem na výstupu z nádrží. Druhá část je vedení od regulátoru ke směšovači. Tlak v této části vedení by měl být konstantní. Jeho velikost je odvozena požadovaným tlakem na vstupu do směšovače. Základní schéma palivového systému je na obrázku 32.



Obrázek 32 – Základní schéma plynového palivového systému

### 2.3.1 Plnicí ventil

Zajišťuje připojení tankovací pistole k vozidlu a skrze vysokotlaké vedení dopravuje palivo do nádrží. Celý systém nabízí například firma Weh GmbH (Německo), která disponuje produkty pro tankování vodíkem poháněných vozidel. Nabízí dva systémy. První pracuje s plnicím tlakem 25 – 30 MPa, druhý dokáže natankovat až do tlaku 70 MPa a je vyobrazen na obrázku 33.



Obrázek 33 – Plnicí ventil pro maximální tlak 70 MPa (Weh GmbH – [www.weh.com](http://www.weh.com), 5.1.2008, [16])

Dalším výrobcem plnicích ventilů použitelných v automobilovém průmyslu je firma OPW Fueling Components (USA). V její nabídce je systém pro tankování vodíku schopný přenášet tlak až 34,5 MPa. Obě firmy také vyrábějí příslušné tankovací pistole.

### 2.3.2 Nádrže

Objem tlakové nádoby a maximální možný tlak rozhodují o hodnotě dojezdu. Požadavek vysokého tlaku na vstupu do motoru značně omezuje rozsah využitelných tlaků. Jsou možná dvě řešení:

- a) použít nádrže pro vyšší tlak

Využitím nových materiálů a technologií, jako například karbon, je možné používat nádrže až s tlakem 70 MPa. Lze též zajistit tepelné odizolování a zaručit tím konstantní teplotu.

- b) vyplachovat nádrže pomocí kompresoru

Kompresor zajistí zvýšení tlaku v nádrži a zajistí tak vytlačení vodíku pod odpovídajícím tlakem. Celý systém je konstrukčně mnohem složitější, náchylnější k poruše, a tím i nebezpečnější. Vyplachující látka nesmí přijít do styku s vodíkem. Kompresor a jeho příslušenství přidají vozidlu na hmotnosti, což povede k vyšší spotřebě paliva. Dalším negativem je přítomnost dalšího spotřebiče ve vozidle, čímž dochází ke snížení výkonu.

Z uvedených skutečností vyplývá, že zvyšování dojezdu vyplachováním nádrží pomocí kompresoru je řešení nouzové a použitelné pouze v nejnútnejších případech.

### **2.3.2.1 Druhy tlakových nádob**

Podle směrnice EIHP (European Integrated Hydrogen Project – Evropský integrovaný vodíkový projekt) lze rozdělit tlakové nádoby do pěti kategorií.

**1) Celokovové**

**2) Částečně ovinuté**

Kovová nádoba je pro zvýšení pevnosti vyztužena obručemi. Obruče nepřenáší žádné zatížení v axiálním směru.

**3) Kompletně ovinuté**

Kovová nádoba je kompletně ovinutá. Ovinutí může přenášet zatížení v axiálním i radiálním směru.

**4) Nekovové**

Nádrž s vnitřní nádobou vyrobenou z nekovového materiálu.

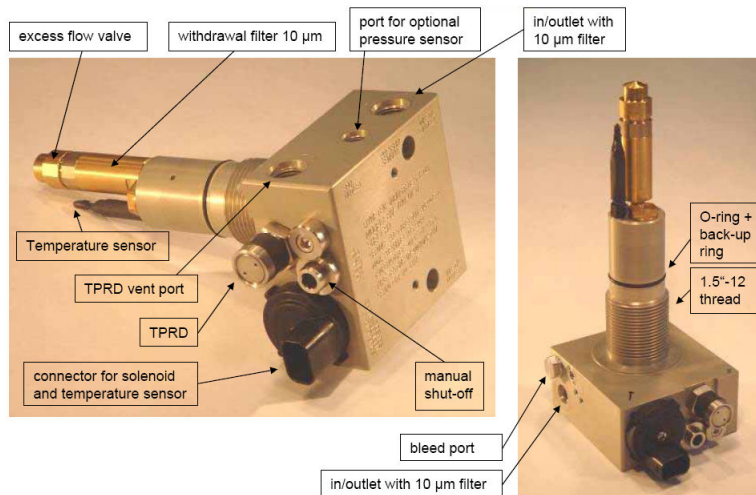
**5) Ostatní**

Ovinutí je většinou provedeno vlákny pryskyřice, skla uhlíku, drátu nebo aramidů. Může být vícevrstvé. Jednotlivé vrstvy mohou být z různých materiálů.

Tlakové nádrže vyrábí mnoho firem a jsou vesměs chráněny patentem. Jejich přesné rozměry a detaily o materiálovém složení podléhají utajení. Pro aplikaci v automobilech jsou použitelné například od firmy Faber Industrie S.p.A. (Itálie), která nabízí nádrže pro tlak 20 – 70 MPa. Velikost nádrží je 30 – 168 litrů.

### 2.3.3 Pojistný ventil

Ventil, přes který jde plyn z vysokotlakého vedení do nádrže, řídí odběr plynu a zajišťuje odpuštění plynu v případě překročení maximálního povoleného tlaku, vyrábí firma Dynetek Europe GmbH (Německo). Vstup a výstup ventilu jsou vybaveny filtry zachycující částice o velikosti větší než 10 µm (in/outlet with 10 µm filter). Vstup a výstup jsou vzájemně zaměnitelné a nachází se přímo proti sobě. Kromě nich je ventil vybaven připojením pro snímač nastaveného tlaku (port for optional pressure sensor), vypouštěcím výstupem (bleed port), ručním uzávěrem (manual shut-off), který lze dálkově ovládat. Ventil je řízen prostřednictvím TPRD vstupu, který je z boku od vzdušněn (TPRD vent port). Součástí ventilu je i teplotní čidlo (temperature sensor), které snímá teplotu plynu v lahvi. Kompletní popis ventilu presentovaný v rámci projektu organizace Fuel Cell and Hydrogen Network North Rhine-Westphalia je na obrázku 34, zapojení do tlakové nádrže pomocí závitů 1,5“ je na obrázku 35. Závit je podle americké normy UNF (Unified Fine Threads) má 12 stoupání na palec a jeho průměr odpovídá 38,1 mm.



Obrázek 34 – Pojistný ventil pro tlak 70 MPa – popis v původním anglickém znění (Dynetek Europe GmbH – [www.dynetek.com](http://www.dynetek.com), 28.1.2008, [19])

### 2.3.4 Vedení vodíku

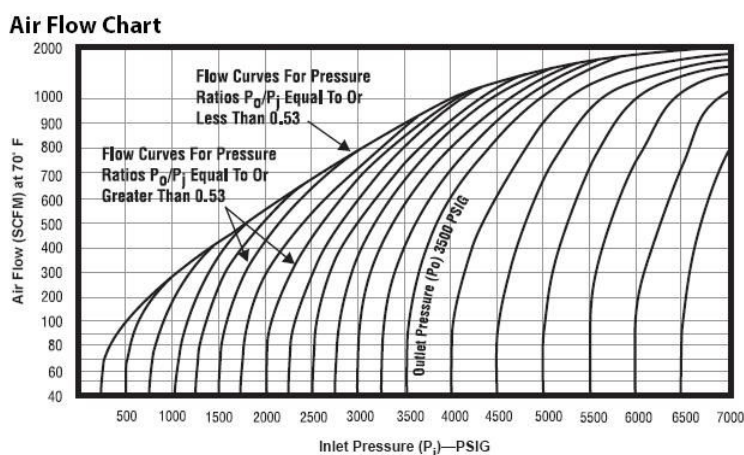
Pro vedení vodíku od plnicího ventilu do nádrže je nutné použít vysokotlaké potrubí. Pracovní tlak bude dosahovat stejné hodnoty, jakou je maximální přípustný tlak v nádrži. Vhodné se zdají být například hadice firmy Parker Hannifin Corporation (USA) označované Polyflex. Jedná se o vícevrstvé hadice skládané z materiálů různých vlastností tak, aby byl zajištěn přenos tlaku a zároveň byla zachována potřebná pružnost. V České republice tyto výrobky nabízí například Kovaz s.r.o. Pardubice, od které je možné získat kompletní katalog.

Jsou schopné přenést velmi vysoké tlaky při celkem dobré ohebnosti, která je nutná pro vedení s minimálními konstrukčními úpravami vozu.

Vedení plynu z nádrží k motoru je rozděleno na dvě části. První část je také zatížena až do velikosti maximálního tlaku v nádržích. Spojuje pojistný ventil umístěný na nádrži s redukčním ventilem. Druhá část je vedena od redukčního ventilu ke směšovači. Je dimenzována na požadovaný vstupní tlak do motoru. Tlak vychází z parametrů a konstrukce motoru. Lze použít produkty firmy Parker nebo Goodridge Ltd (Velká Británie).

### 2.3.5 Regulační ventil

Regulace tlaku na vstupu do motoru je vzhledem k vysokým hodnotám tlaku obtížná. Redukční ventil pracuje v určitém rozsahu nastavení. Při regulaci tlaku dochází ke změně průtoku ventilem v závislosti na tlaku vstupujícím do redukčního ventilu. Grafické znázornění charakteristiky ventilu je na obrázku 35. Protože producenti ventilů jsou většinou z USA, jsou tlaky v informačních materiálech uvedeny v jednotkách PSI (libra na čtverečný palec). Pro převod platí  $1 \text{ PSI} = 6894,76 \text{ Pa}$ . Jednotlivé křivky ukazují závislost průtoku vzduchu na změně vstupního tlaku pro jednotlivá nastavení výstupního tlaku. Jednotkou průtoku je v tomto případě SCFM (krychlová stopa za minutu při normálním stavu), jejíž velikost odpovídá  $0,028316846592 \text{ m}^3/\text{s}$ . Průtok je měřen při teplotě 70 F, což odpovídá podle vztahu  $^{\circ}\text{C} = \frac{5}{9}(F - 32)$  přibližně teplotě 21°C.



Obrázek 35 – Závislost průtoku vzduchu na vstupním tlaku při nastaveném výstupním tlaku (Circle Seal Control, Inc. – [www.circlesealcontrol.com](http://www.circlesealcontrol.com), 13.4.2008, [28])

V charakteristice jsou patrné oblasti, kdy je změna průtoku pro relativně malou tlakovou změnu velká (Flow curves for pressure ratios  $P_o/P_i$  equal to or greater than 0,53). Jedná se o oblast, kdy je poměr výstupního tlaku  $P_o$  ku vstupnímu tlaku  $P_i$  větší nebo roven

0,53. V případě, že je tento poměr menší, platí plošší část křivky (Flow curves for pressure ratios  $P_o/P_j$  equal to or less than 0,53).

Podrobnější informace o rozměrech regulátoru jsou uvedeny v kapitole 3.3.4 u konkrétně použitého regulátoru.

## 2.4 Bezpečnostní opatření

S ohledem na možný únik plynu se do prostorů, kudy vede palivo, instalují čidla schopná detekovat zvýšenou koncentraci vodíku ve vzduchu. Nabízí je například firma RKI, mají kompaktní rozměry a dají se umístit na požadovaná místa. Pro srovnání je na obrázku 36 vedle čidla vyobrazena mince v hodnotě 25 Centů, tzv. „čtvrták“, používaná v USA.



Obrázek 36 – Čidlo detekující zvýšenou koncentraci vodíku (RKI, [www.fuelcellsensor.com](http://www.fuelcellsensor.com), [29])

Specifikace čidla je v tabulce 5. Jak je zřejmé z údajů v tabulce, čidlo má omezenou provozní teplotu. Zejména dolní hranice ( $-10^{\circ}\text{C}$ ) je v pro použití ve střední Evropě nedostatečná.

Specifikace	
Metoda odběru vzorku:	Katalitická difuze
Měřicí rozsah:	0 – 5 000 ppm
	0 – 10 000 ppm
Provozní teplota:	$-10^{\circ}\text{C}$ – $+80^{\circ}\text{C}$
Provozní vlhkost:	0 – 95% RH (nekondenzační)
Rozměry [mm]:	99 (délka včetně připojení) x 70 (šířka) x 12,5 (výška)
Hmotnost:	215 g (240 g – s montážní konzolou)
Napájení:	1 W při 12 V (DC)
Signál:	0,5 – 4,5 V (DC) úměrný nastavenému rozsahu
Odezva:	$\leq 10$ s do 90% koncentrace

Tabulka 5 – specifikace čidla detekujícího přítomnost vodíku (RKI, [www.fuelcellsensor.com](http://www.fuelcellsensor.com), [29])

### **2.4.1 Normy a předpisy pro kompozitové nádoby na stlačený plyn**

Kompozitové nádrže musí splňovat zvláštní bezpečnostní předpisy. Existuje několik norem, které se vzájemně překrývají a dají se použít při výrobě nádrží. Nejkomplexněji se legislativě provozu a stavbě vozů s vodíkovým pohonem věnuje již zmíněný Evropský integrovaný vodíkový projekt (EIHP), dále pak například norma ISO 15869. Norma předepisuje testy, kterým musí tlaková nádoba vyhovět.

Další použitelný legislativní předpis je ČSN EN 12245 – Lahve pro přepravu plynů – plně ovinuté kompozitové lahve. Tato evropská norma byla vypracována technickou komisí CEN/TC 23 „Lahve na přepravu plynů“. Účelem této normy je vymezení požadavků pro konstrukci, výrobu, kontrolu a zkoušení bezešvých plně ovíjených kompozitových lahví na plyny s možností opakovaného plnění. Vymezují se pouze určující znalosti a zkušenosti s materiály, požadavky konstrukce, výrobního procesu a kontroly během výrobního procesu lahví na plyny společně používaných v členských státech CEN. Norma stanoví minimální požadavky na materiály, návrh, konstrukci, prototypové zkoušky a běžnou praxi výrobní kontroly kompozitových lahví na plyny s vodním objemem do 450 litrů včetně pro stlačené, zkapalněné a pod tlakem rozpuštěné plyny. Norma se používá pro lahve obsahující bezešvý kovový liner vyztužený na povrchu převážné části lahve rovnoběžnými dlouhými vlákny kompozitu ze skla uhlíku, aramidu nebo drátu. Neurčuje provedení fitinků a vybavení snímatelnými ochrannými pouzdry. Tyto součásti by měly být uvažovány samostatně. Normu nelze použít pro lahve, které jsou vlákny "částečně ovíjené", pro částečně ovíjené lahve platí EN 12257. Norma ČSN EN 12245 odkazuje na předpisy týkající se přepravy nebezpečného zboží (ADR a RID). Byla připravena na základě mandátu uděleného CEN Evropskou komisí a Evropským sdružením volného obchodu a podporuje cíle systému Nařízení pro přepravu nebezpečného zboží. Zkoušení je obdobné jako v případě normy ISO 15869.

Pro kompozitové tlakové lahve lze využít také předpisu DOT-CFFC, který vydala americká instituce – U.S. Department of Transportation.



### 3 Aplikace vybraného řešení vodíkového pohonu do vozu Škoda Roomster

#### 3.1 Základní informace o voze

Škoda Roomster patří do kategorie zvané mini MPV. V posledních letech dochází k značnému nárůstu počtu kategorií vozidel. Výrobci se snaží reagovat na požadavky trhu a vozidla maximálně přizpůsobit požadavkům zákazníků. Zároveň se snaží zaplnit mezery na trhu, a proto vznikají vozy spojující přednosti vozů jiných kategorií. Vozidlo nabízí při zachování kompaktních rozměrů malého vozu zavazadlový prostor běžný u kombi nižší střední třídy. Informace o rozměrech vozu včetně nákresu jsou uvedeny v tabulce 8, podrobnější technické údaje jsou uvedeny v tabulce 9. Pohotovostní hmotnost a hodnota užitečného zatížení se mohou měnit v závislosti na zvoleném motoru.



Obrázek 37 – Škoda Roomster (Škoda Auto – internetová prezentace modelu, 5.3.2008, [25])

Základní rozměry a hmotnosti:	
	
rozvor náprav	2617 mm
rozchod kol vpředu/vzadu	1436/1500 mm
míra komfortu vpředu max./min.	1063/843 mm
míra komfortu vzadu max./min.	945/700 mm
základní objem zavazadlového prostoru	450 l, (po vyjmutí zadních sedadel až 1780 l)

Tabulka 6 – Nákres a rozměry vozu Škoda Roomster (Škoda Auto – internetová prezentace modelu, 5.3.2008, [25])

Technická data – Škoda Roomster	
<b>Hmotnosti</b>	
Svislé zatížení koule tažného zařízení	50 kg
Celková hmotnost	1780 kg
Pohotovostní hmotnost	1160 kg
Užitečné zatížení	515 kg
Dovolené zatížení střechy	75 kg
Hmotnost přípoj. vozidla brzd./nebrzd. - stoupání 12 %	700/450 kg
<b>Karoserie</b>	
Karoserie	pětidveřová, pětimístná, dvouprostorová
Součinitel odporu vzduchu	0,33 Cw
<b>Náplně</b>	
Objem palivové nádrže	55 l
<b>Podvozek</b>	
Přední náprava	zavěšení McPherson se spodními trojúhelníkovými rameny a příčným zkrutným stabilizátorem
Zadní náprava	kliková s vlečenými rameny
Brzdy	kapalinové dvouokruhové, diagonálně propojené s podtlakovým posilovačem
Brzdy vpředu	kotoučové, s vnitřním chlazením a jednopístovými plovoucími třmeny
Brzdy vzadu	bubnové
Parkovací brzda	ruční mechanická na zadní kola
Řízení	hřebenové přímočinné s elektrohydraulickým posilovačem
<b>Pohon</b>	
Pohon	Pohon předních kol
Spojka	hydraulicky ovládaná, jednokotoučová
Převodovka	mechanická pětistupňová, plně synchronizovaná

Tabulka 7 – Technické údaje vozu Škoda Roomster (Škoda Auto – internetová prezentace modelu, 5.3.2008, [25])

V nabídce pohonných jednotek jsou tři zážehové a tři varianty vznětových motorů. Zážehové motory jsou vybaveny čtyřventilovou technikou, nejsilnější motor 1,6 16V o výkonu 77 kW může být vybaven automatickou převodovkou.

Škoda Roomster- motorová paleta - zážehové motory				
Motor	1,2 12V HTP	1,4 16V	1,6 16V	1,6 16V (A)
Zdvihový objem [cm <sup>3</sup> ]	1198	1390	1598	1598
Válce/ventily	3/4	4/4	4/4	4/4
Nejvyšší výkon [kW/ot/min]	47/5400	63/5000	77/5700	77/5700
Nejvyšší toč. mom. [Nm/ot/min]	112/3000	126/3300	155/3500	155/3500
Max. rychlost [km/h]	155	171	184	183
Zrychlení 0-100 km/h [s]	16,9	13	10,9	12,1
Komb. spotřeba [l/100 km]	6,6	6,8	7	8,1

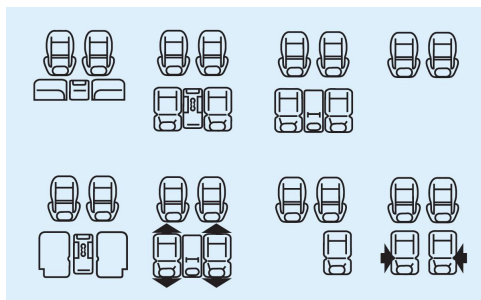
Tabulka 8 – Škoda Roomster – motorová paleta – zážehové motory (internetový magazín o automobilech – www.auto.cz, Ondřej Láník, 13.3.2006, [12])

Vznětové motory jsou ve skutečnosti v nabídce dva, přičemž tříválec o objemu 1,4 l může být naladěn buď na 51 nebo 59 kW. V případě silnějšího naladění lze motor stejně jako větší pohonnou jednotku označenou 1,9 TDI vybavit filtrem pevných částic.

<b>Škoda Roomster - motorová paleta - vznětové motory</b>			
Motor	1,4 TDI PD (51 kW)	1,4 TDI PD (59 kW)	1,9 TDI PD (77 kW)
Zdvihový objem [cm <sup>3</sup> ]	1422	1422	1896
Válce/ventily	3/2	3/2	4/2
Nejvyšší výkon [kW/ot/min]	51/4000	59/4000	77/4000
Nejvyšší toč. mom. [Nm/ot/min]	155/1600 – 2800	195/2200	240/1800
Max. rychlost [km/h]	158	165	182
Zrychlení 0-100 km/h [s]	16,5	14,7	11,5
Komb. spotřeba [l/100 km]	5,3	5,1	5,4

Tabulka 9 – Škoda Roomster – motorová paleta – vznětové motory (internetový magazín o automobilech – [www.auto.cz](http://www.auto.cz), Ondřej Láník, 13.3.2006, [12])

Jako jednu z hlavních výhod prezentuje Škoda Auto systém Varioflex, který umožňuje posouvat jednotlivá zadní sedadla, sklápět je nebo je vyjmout z vozu ven. Po vyjmutí prostředního sedadla se dají krajní přisunout více do středu vozu a umožní nárůst prostoru pro cestující zejména v oblasti ramen. Pro maximální možné přiblížení reálnému uvedení do provozu je vhodné zachovat stávající velikost zavazadlového prostoru a variabilitu vnitřního uspořádání sedadel. Bylo by vhodné ponechat vozu tuto výhodu i po přestavbě na vodíkový pohon. Proto budou vodíkové nádrže umístěny tak, aby nezasahovaly do zavazadlového prostoru.



Obrázek 38 – Možná uspořádání sedadel se systémem Varioflex (Škoda Auto – internetová prezentace modelu, 5.3.2008, [25])

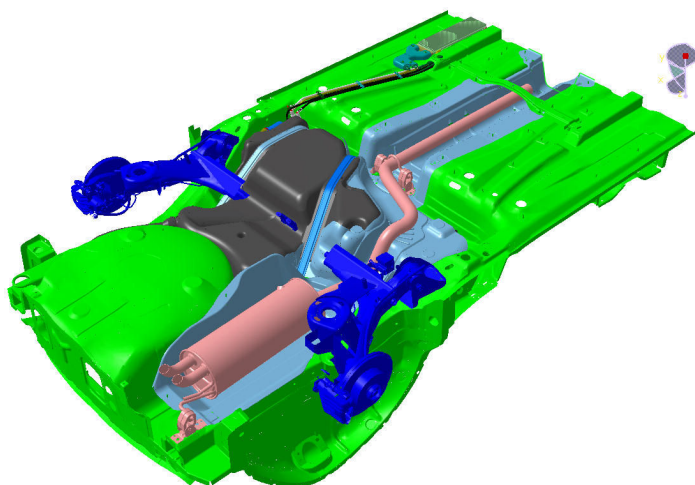
### 3.2 Současný stav

Podvozek modelu Roomster je složen ze tří hlavních částí. Přední část využívá koncernovou platformu pro vozy kategorie A0 a je shodná s nejnovější generací modelu Fabia. Zadní část vozu je ze starší generace platformy A využívané na voze Octavia první generace. První generace vozu Octavia se v současné době prodává pod označením Octavia Tour. Díky zmiňované zadní části z vozu vyšší třídy disponuje Roomster vzadu větším

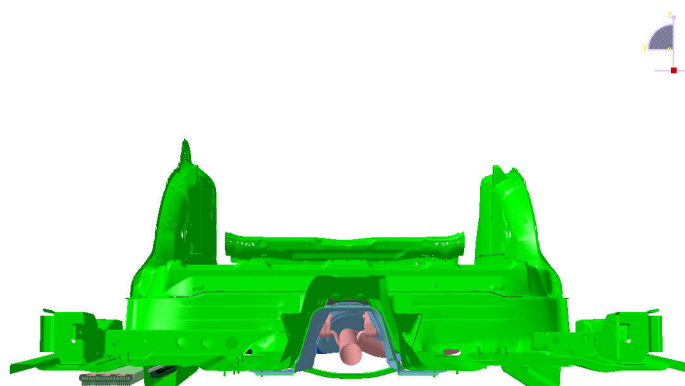
rozchodem. Mezi přední a zadní částí se nachází střední díl zkonstruovaný speciálně pro Roomster. Vzhledem k výhodám systému Varioflex je vhodné zachovat původní uspořádání interiéru a zavazadlového prostoru a umístit tlakové nádoby do oblasti kolem zadní nápravy. Dobrou inspirací je například řešení pohonu pomocí stlačeného zemního plynu v koncernově příbuzném voze VW Touran. Touran sice využívá novější generaci podvozkové platformy A, nicméně koncepce je velmi podobná té, kterou disponuje model Roomster. Pohled na nádrže se stlačeným zemním plynem a celkové řešení pohonu vozu VW Touran je na obrázku 39. Současný stav umístění standardní palivové nádrže je na dalších stranách. Zadní část vozu osazená nápravou, nádrží, výfukovým potrubím a teplotní ochranou je na obrázcích 40, na obrázku 41 je pohled zezadu a na obrázku 42 je pohled zespodu.



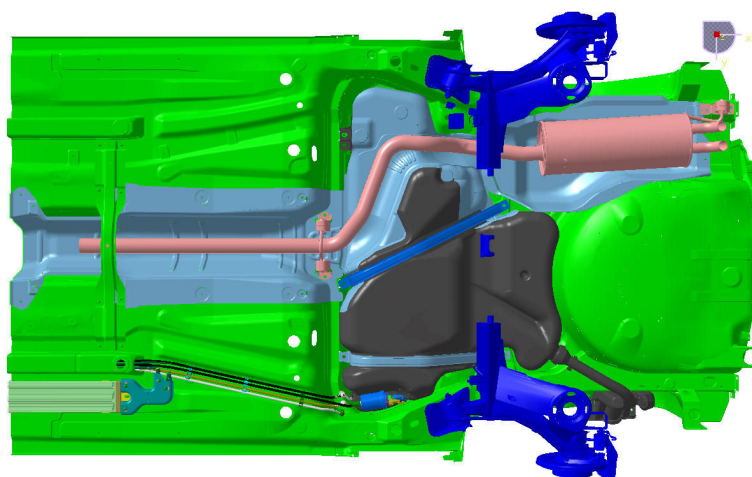
*Obrázek 39 – VW Touran Eco Fuel – schéma umístění nádrží na stlačený zemní plyn a hlavních komponentů pohonu (Volkswagen AG, [www.volkswagen.de](http://www.volkswagen.de), 12.3.2008, [27])*



*Obrázek 40 – Podvozková platforma PQ258 – zadní část, nádrž, náprava a výfukové potrubí s tepelným stíněním (Škoda Auto – interní dokumentace, 5.3.2008, [26])*



Obrázek 41 – Podvozková platforma PQ258, pohled zezadu – zadní část, nádrž, náprava a výfukové potrubí s tepelným stíněním (Škoda Auto – interní dokumentace, 5.3.2008, [26])



Obrázek 42 – Podvozková platforma PQ258, pohled zespodu – zadní část, nádrž, náprava a výfukové potrubí s tepelným stíněním (Škoda Auto – interní dokumentace, 5.3.2008, [26])

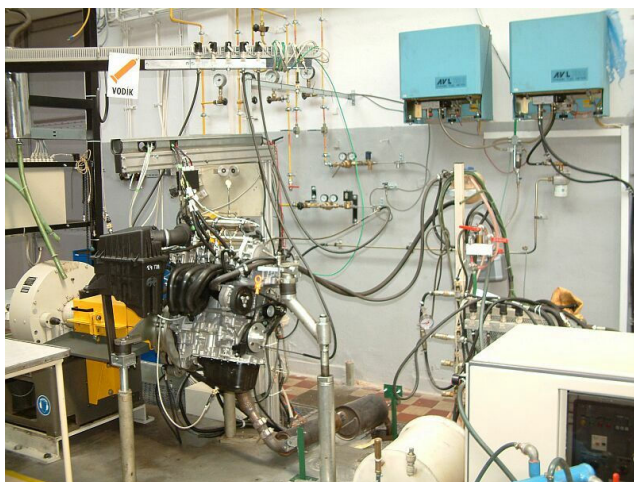
### 3.3 Aplikované prvky vodíkového pohonu a jejich umístění

Pro zajištění provozuschopnosti vozidla je nutné navrhnout takové řešení, které zaručí přijatelnou dojezdovou vzdálenost, neomezí posádku v komfortu a nezvýší přílišně hmotnost vozu. Jak bylo uvedeno v kapitole 2.2, dojezdová vzdálenost se dnes pohybuje od 500 do 1200 km podle charakteru využívání vozidla. V kategorii vozů MPV je tato hodnota spíše vyšší. U modelu Roomster vybaveného naftovým motorem o objemu 1,9 l s výkonem 77 kW udává výrobce průměrnou spotřebu 5,4 l/100 km. Při objemu nádrže 55 litrů překračuje teoretická dojezdová vzdálenost těsně hranici 1000 km. Benzinová verze s motorem 1,2 HTP



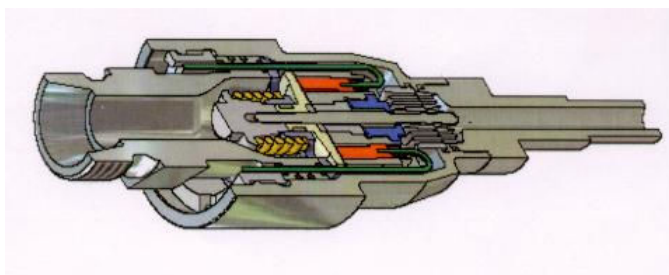
s výkonem 51 kW má stejně velkou nádrž. Kombinovaná spotřeba je podle údajů výrobce 6,6 l/100 km. Teoretická dojezdová vzdálenost je přibližně 830 km. Objem zavazadlového prostoru, hmotnost vozu a jízdní výkony byly uvedeny v kapitole 3.1.

Pro přestavbu na vodíkový pohon je určen vůz s tříválcovým motorem 1,2 HTP se dvěma ventily na každý válec. Motor je připojen k dynamometru v laboratořích Katedry vozidel a motorů Technické univerzity v Liberci (dále jen KVM), ovšem prozatím nebyl zkoušen. Spotřebu paliva je tedy nutné určit výpočtem.

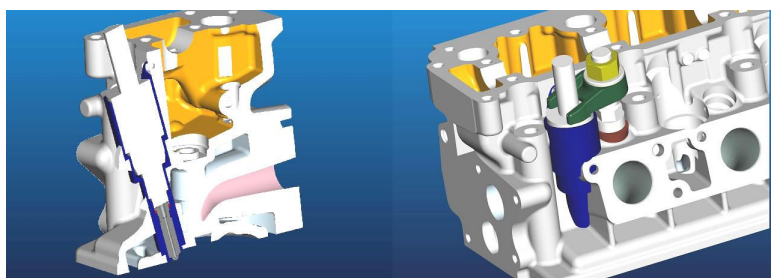


Obrázek 43 – Fotografie motoru Škoda 1,2 HTP připojeného k dynamometru v laboratořích KVM

Vstřikování paliva je zajištěno injektory od firmy Hoerbiger Valve Tec se vstupním tlakem 10 MPa. Pro tyto účely byla upravena hlava motoru. Injektory jsou na obrázku 44, model upravené hlavy na obrázcích 45 a 46.



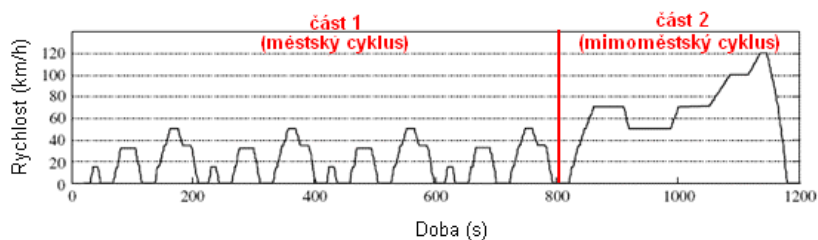
Obrázek 44 – Řez vstřikovačem vodíku (Scholz C.: Výzkum a vývoj vodíkového motoru, Liberec 2007, [30])



Obrázek 45 – Zabudování vstřikovačů do hlavy válců (Scholz C.: Výzkum a vývoj vodíkového motoru, Liberec 2007, [30])

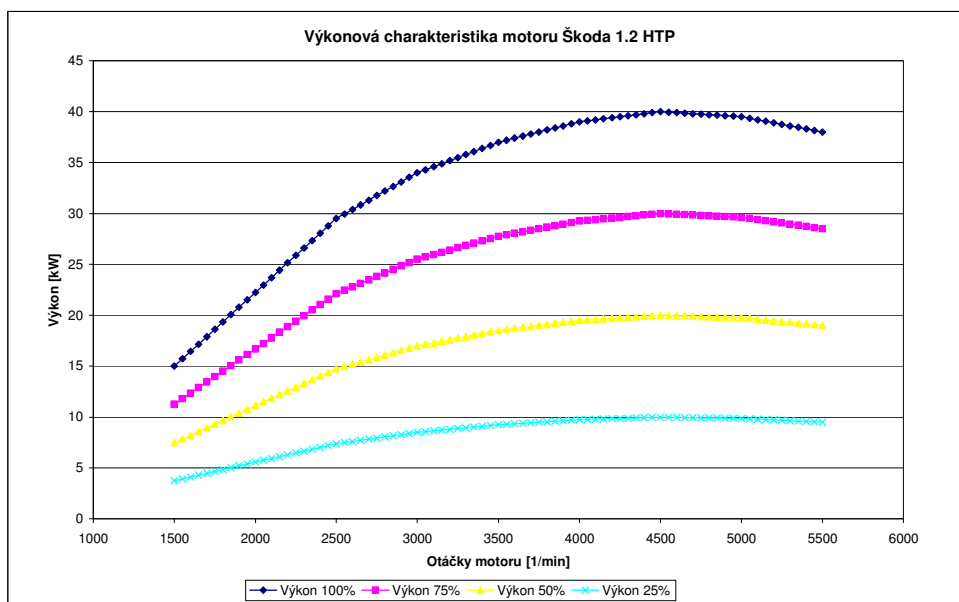
### 3.3.1 Výpočet spotřeby paliva

Pro měření spotřeby paliva je určen normovaný test podle směrnice č.70/220/EHS, podle které má test dvě bezprostředně po sobě jdoucí části – režim město a režim mimo město. Během části simulující pohyb po městě najede vozidlo přibližně 4 km při průměrné rychlosti 19 km/h. Část testu měřící spotřebu pro provoz mimo město je dlouhá 7 km s průměrnou rychlostí 63 km/h. Jeho průběh je zobrazen na obrázku 46.



Obrázek 46 – Graf celého průběhu testu pro stanovení spotřeby osobního vozu v režimu město a mimo město (Scholz C., Blažek J.: Zařízení pro emisní testy osobních automobilů, 1.10.2007, [31])

Průběh testu byl přibližně nasimulován podle výkonových parametrů motoru a daných vlastností vodičky uvedených v kapitole 1.2. Výkonová charakteristika motoru je na obrázku 47.



Obrázek 47 – Průběh výkonu motoru v závislosti na otáčkách

Simulační program pracuje se značným zjednodušením. Podle definovaného průběhu testu se ze vztahu

$$F_K = G \cdot f + 0,63 \cdot c_x \cdot S_x \cdot v^2 + m \cdot \vartheta \cdot a \quad [N]$$

vypočítá potřebná síla na kolech. Hodnota součinitele odporu valení byla zvolena  $f = 0,015$ , součinitel vlivu rotačních částí  $\vartheta = 1,2$ . Vynásobením síly na kolech dynamickým poloměrem kola se získá velikost točivého momentu na kolech. Vozidlo je vybaveno 14ti palcovými koly s pneumatikami 175/70. Jmenovitý poloměr kola je

$$r = \frac{14 \cdot 25,4 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 175 \cdot 0,7 \cdot 10^{-3}}{2} = 0,3003 \quad [m]$$

Hodnota dynamického poloměru kola se příliš od jmenovitého příliš neliší a lze tak pro výpočet považovat za dostatečně přesnou. Přivedený moment je

$$M_K = F_K \cdot r. \quad [Nm]$$

Moment na motoru se počítá podle vztahu

$$M_M = \frac{M_K}{i_P \cdot i_S} \cdot \eta_M \quad [Nm]$$

Hodnoty převodů jednotlivých stupňů a stálého převodu jsou v tabulce 10. Mechanická účinnost byla uvažována 95%.

Převodový stupeň	I	II	III	IV	V
Převod $i_P$	3,308	1,913	1,267	0,975	0,795
Stálý převod $i_S$	3,833				

Tabulka 10 – Hodnoty převodů na jednotlivé stupně (Škoda Auto – interní dokumentace, 5.3.2008, [26])

Pro zjištění výkonu motoru je nutné znát jeho otáčky, které se zjistí z otáček kola. U vozidla jedoucího rychlostí  $v$  jsou otáčky kola

$$n_K = \frac{60 \cdot v}{2\pi \cdot r} \quad \left[ \frac{1}{\text{min}} \right]$$

Otáčky motoru jsou

$$n_M = n_K \cdot i_P \cdot i_S \quad \left[ \frac{1}{\text{min}} \right]$$

Výkon motoru je

$$P_M = M_M \cdot 2\pi \cdot n_M \cdot 10^{-3} \quad [kW]$$

Pro jednotlivé hodnoty výkonu motoru vypočítá podle vztahu

$$M_P = \frac{P_M}{H_u \cdot \eta} \quad \left[ \frac{g}{s} \right]$$

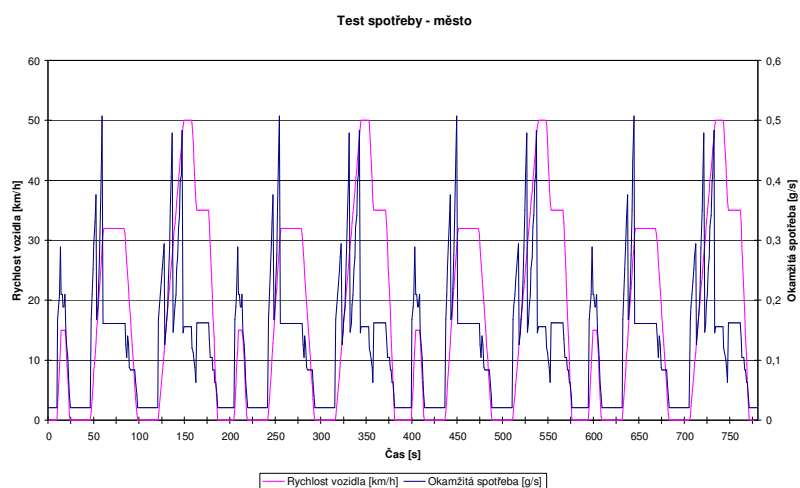


hmotnostní spotřeba paliva za předpokladu účinnosti motoru 30%. Po dosazení výhřevnosti vodíku a maximálního výkonu motoru vyjde hmotnostní spotřeba 1,12 g/s. Protože účinnost motoru není konstantní, je lepší počítat s měrnou spotřebou.

$$m_{Pe} = \frac{M_p \cdot 3600}{P_{eM}} \left[ \frac{g}{kW \cdot h} \right]$$

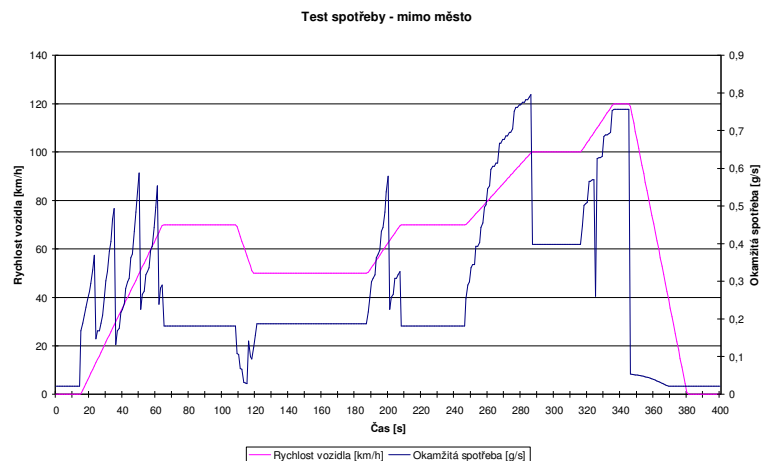
V simulačním programu byly jednotlivým rychlostem vozidla v daný čas přiřazeny převodové stupně a vypočten výkon motoru a jeho zatížení. Podle zatížení motoru a rychlosti vozidla byla zjištěna aktuální spotřeba. Pro zvýšení přesnosti simulačního programu bylo nejprve použito jako palivo benzín. Získané hodnoty se shodovaly s údaji uváděnými výrobcem. Výsledná hodnota spotřeby při použití vodíku je ovšem i tak pouze orientační.

Pro městský cyklus je průběh spotřeby znázorněn v grafu na obrázku 48. Průměrná spotřeba vodíku vyšla po přepočtení 2,674 kg/100 km.



Obrázek 48 – Průběh okamžité spotřeby během testu spotřeby v režimu město

Pro režim mimo město byla simulací zjištěna spotřeba vodíku 30 l/100 km odpovídající hodnotě 1,573 kg/100 km. Graf okamžité spotřeby a rychlosti vozidla během testu je na obrázku 49.

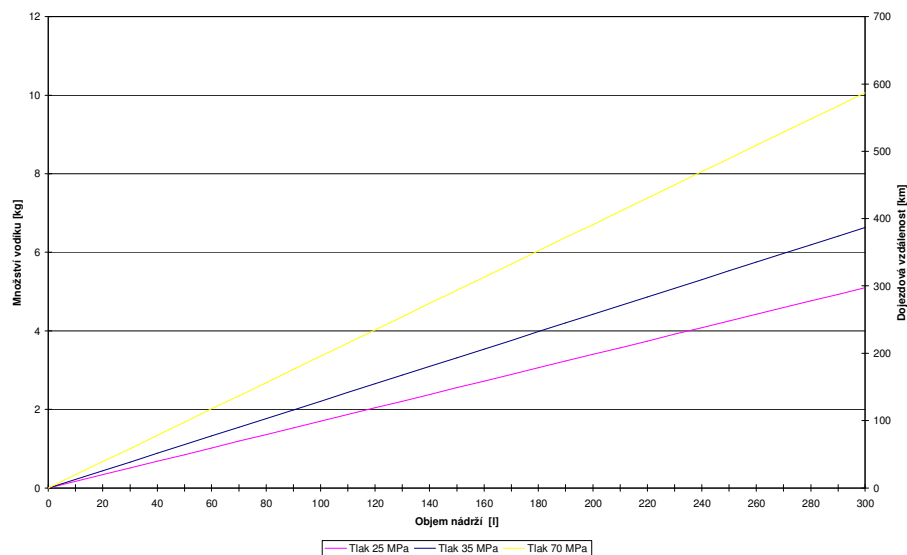


Obrázek 49 – Průběh okamžité spotřeby během testu spotřeby v režimu mimo město

Kombinovaná spotřeba se vypočte jako průměr vzhledem k ujeté vzdálenosti v jednotlivých režimech testu. Po dosazení je její hodnota

$$\frac{4 \cdot 2,674 + 7 \cdot 1,573}{11} = 1,973 \quad \left[ \frac{\text{kg}}{100 \text{ km}} \right]$$

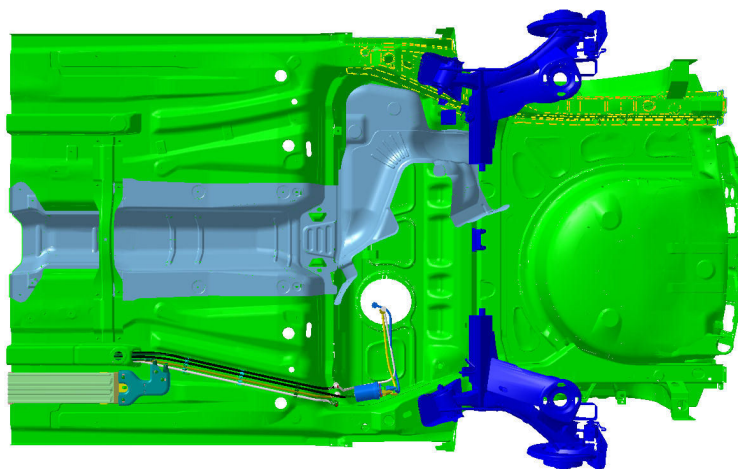
V grafu na obrázku 50 je vidět závislost množství paliva a tím i dojezdové vzdálenosti při různých hodnotách tlaku v nádržích (25 MPa, 35 MPa a 70 MPa) na objemu tlakových nádob.



Obrázek 50 – Závislost množství paliva a dojezdové vzdálenosti na objemu nádrží

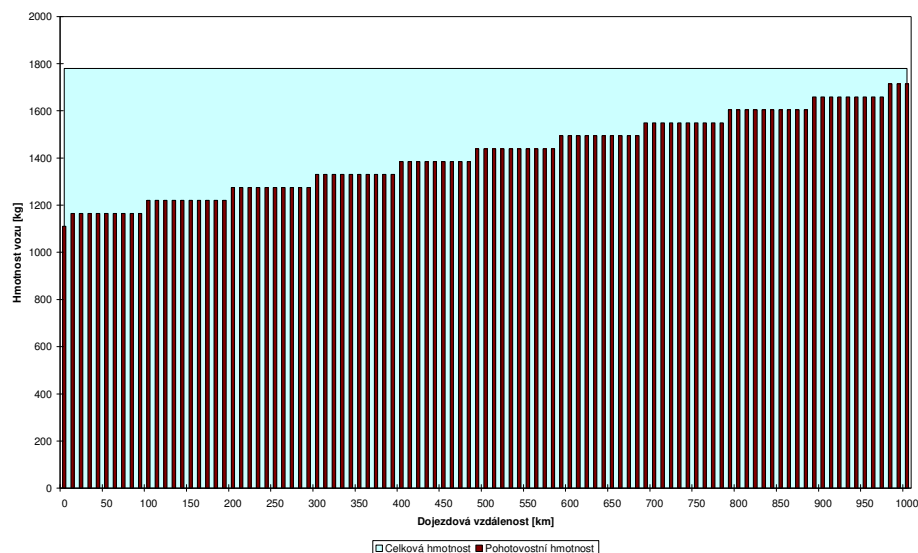
Objem tlakových nádob je stejně jako jejich počet limitován hmotností vozu. Za předpokladu zachování celkové hmotnosti vozu na stejné hodnotě (1780 kg) nesmí dojít k nárůstu pohotovostní hmotnosti. Demontáží prvků benzinového palivového systému uvažují

pokles pohotovostní hmotnosti přibližně o 50 kg na hodnotu 1110 kg. Především se jedná o hmotnost samotného paliva, jehož 55 l váží přibližně 38,5 kg.



Obrázek 51 – Podvozek vozu Škoda Roomster bez nádrže a výfukového potrubí (Škoda Auto – interní dokumentace, 5.3.2008, [26])

U systému spalujícího vodík jsou nejhmotnějším prvkem tlakové nádoby, proto je do grafu na obrázku 52 vynesena pohotovostní hmotnost vozu s nádržemi o objemu 50 l od firmy Faber Cylinders pracujících s tlakem až 70 MPa bez ventilů a ostatního příslušenství v závislosti na dojezdové vzdálenosti. Je zřejmé, že je bezúčelné zvyšování počtu nádrží a tím i pohotovostní hmotnosti vozu nad hodnotu 1380 kg. Užitečné zatížení klesne pod hodnotu 400 kg a automobil nemůže být využíván jako pětímístný s možností přepravy zavazadel. Jako optimální hodnota dojezdu se jeví oblast od 200 do 480 km, kdy je vozidlo provozuschopné s užitečným zatížením 395 až 565 kg. Objem nádrží pro odpovídající množství paliva je v intervalu 100 až 250 litrů. Vozidlo s vodíkovým pohonem prozatím nemůže svým akčním rádiem konkurovat dnešním vozům s motory spalujícími benzin nebo naftu.



Obrázek 52 – Závislost pohotovostní hmotnosti a užitečného zatížení na dojezdové vzdálenosti

### 3.3.2 Nádrže na stlačený vodík, pojistné ventily

Podle výše uvedených požadavků bude nutné umístit do vozu soustavu nádrží o objemu minimálně 100 litrů. Nádrže na stlačený vodík jsou vyrobeny z kompozitového materiálu, každá z nich je vybavena elektronicky řízeným pojistným ventilem. Pro účely tohoto projektu byly vybrány jako základ tlakové nádoby od firmy Faber Cylinders. Podle dostupné dokumentace (obrázek 53), kterou firma poskytla, byly v prostředí ProEngineer namodelovány jednotlivé tlakové nádoby tak, aby vyhovovaly svým objemem a vnějšími rozměry.

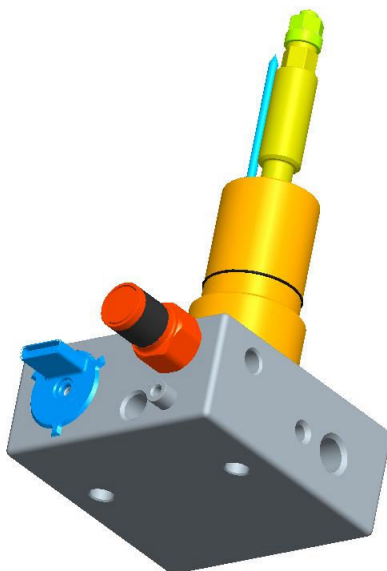


Obrázek 53 – Rozměrová dokumentace tlakových lahví – v původním anglickém znění (Faber Industries – [www.faber-italy.com](http://www.faber-italy.com), 6.1.2008, [18])



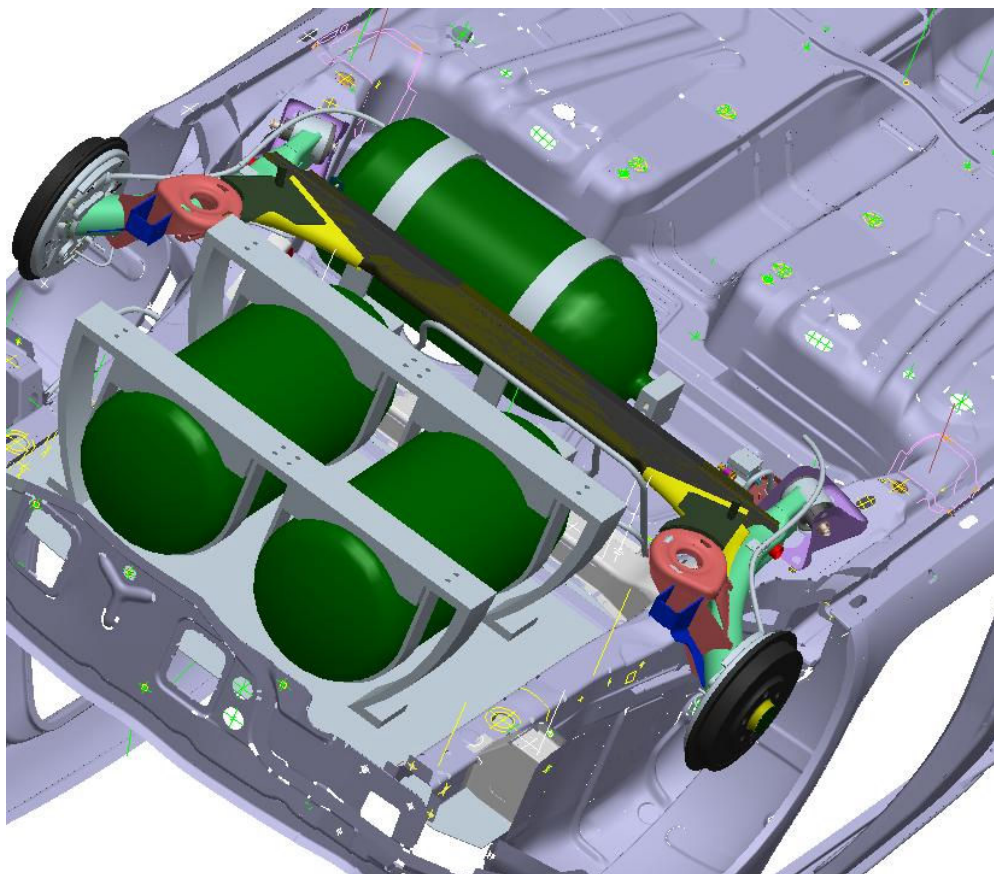
*Obrázek 54 – Model tlakové lahve o objemu 26 l vytvořený v prostředí programu ProEngineer*

Pojistné ventily byly zvoleny ze sortimentu firmy Dynetek. Jejich podrobnější popis je v kapitole 2.3.3. Stejně jako nádrže byl i ventil namodelován v prostředí ProEngineer.

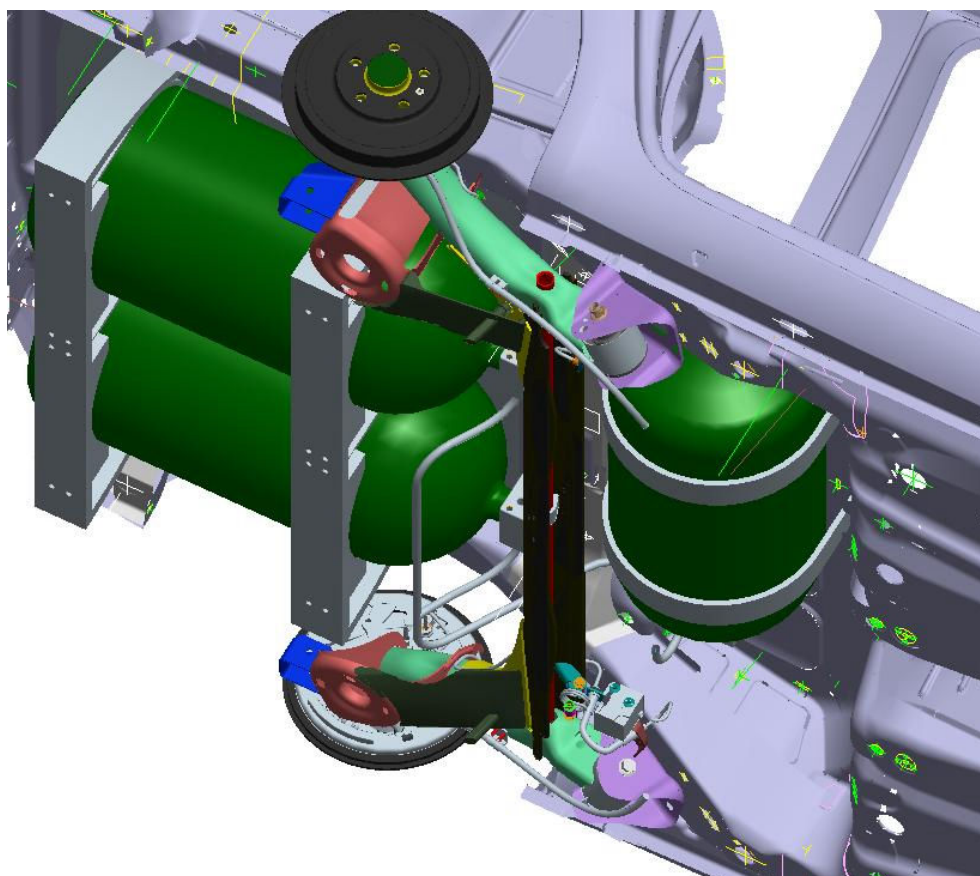


*Obrázek 55 – Model pojistného ventilu vytvořený v prostředí programu ProEngineer*

První nádrž se dá umístit kolmo ke směru jízdy do prostoru, kde se standardně nachází nádrž na benzin. Nelze zde použít sériově vyráběnou nádrž o objemu 50 litrů, ale nádrž musí být kratší a její vnější průměr musí být menší. Její objem je snížený na 26 l, délka je 660 mm, vnější průměr 299 mm. Další nádrže lze umístit paralelně se směrem jízdy za zadní nápravu. Musí být nejprve odstraněn díl s prolisem pro rezervní kolo a nahrazen dílem novým. Díky tomu vzniká rovná plocha, pod kterou se dají umístit dvě další nádrže. Jsou užší než sériově vyráběné (vnější průměr 299 mm), jejich objem je 36 l. Celkový objem nádrží (98 l) umožní uskladnění 3,75 kg vodíku. Podle vypočtené kombinované spotřeby paliva je dojezd vozu téměř 200 km.



Obrázek 56 – Znázornění zabudovaných nádrží na stlačený vodík

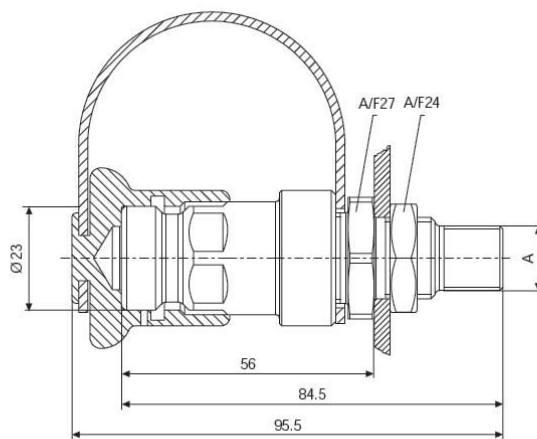


Obrázek 57 – Znázornění zabudovaných nádrží na stlačený vodík



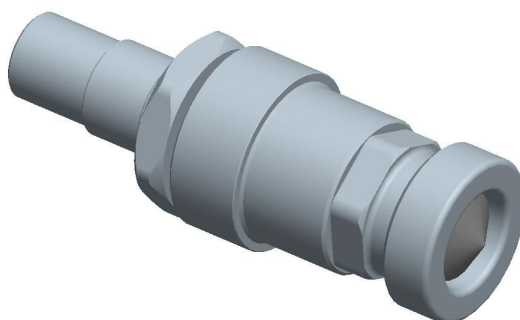
### 3.3.3 Plnicí ventil

Jak bylo zmíněno v kapitole 2.3.1, tankovací systém pracující s tlakem 70 MPa nabízí například firma Weh. Model ventilu byl vytvořen v programu ProEngineer podle veřejně dostupné firemní dokumentace, která je na obrázku 58.

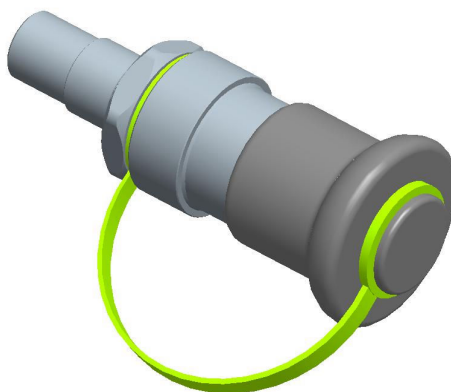


Typ TN1 H<sub>2</sub> 70 MPa

Obrázek 58 – Základní rozměry plnicího ventilu Weh TN1 H<sub>2</sub> 70 MPa, (Weh GmbH – [www.weh.com](http://www.weh.com), 5.1.2008, [16])



Obrázek 59 – Model plnicího ventilu bez zakrytování vytvořený v prostředí programu ProEngineer



Obrázek 60 – Model plnicího ventilu včetně ochranné krytky vytvořený v prostředí programu ProEngineer

Firma nabízí různé typy možného připojení. Na obrázku 58 je vyznačeno jako rozměr A, jehož detailnější popis je v přehledu na obrázku 61.

Description	Inlet A	Part No.
TN1 H <sub>2</sub> 70 MPa	O-lok Face Seal* for 6 mm (1/4") tube	C1-75560
TN1 H <sub>2</sub> 70 MPa	O-lok Face Seal* for 6 mm (1/4") tube	C1-75622
TN1 H <sub>2</sub> 70 MPa	O-lok Face Seal* for 10 mm (3/8") tube	C1-75092
TN1 H <sub>2</sub> 70 MPa**	O-lok Face Seal* for 6 mm (1/4") tube	C1-84087
TN1 H <sub>2</sub> 70 MPa** prepared for IR-Part	O-lok Face Seal* for 6 mm (1/4") tube	C1-84883

\* Face Seal acc. to SAE J1453

\*\* acc. to SAE TIR J2799

*Obrázek 61 – Rozměry připojovacího závitů plnicího ventilu Weh TN1 H<sub>2</sub> 70 MPa, (Weh GmbH Illertissen – [www.weh.com](http://www.weh.com), 5.1.2008, [16])*

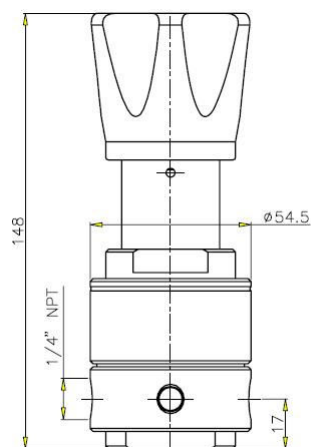
Při aplikaci vodíkového pohonu je vhodné zachovat v celém obvodu konstantní průřezový průřez, tzv. jmenovitou světlost. Vzhledem k dalším prvkům obvodu, zejména pojistným ventilům zmíněným výše, se jeví jako vhodný vnitřní průměr 6 mm, proto byl aplikován ventil C1-75560.

Ventil je umístěn v místech, kde má model Roomster standardně hrdlo palivové nádrže, tj. na pravé straně.

### 3.3.4 Regulační ventil

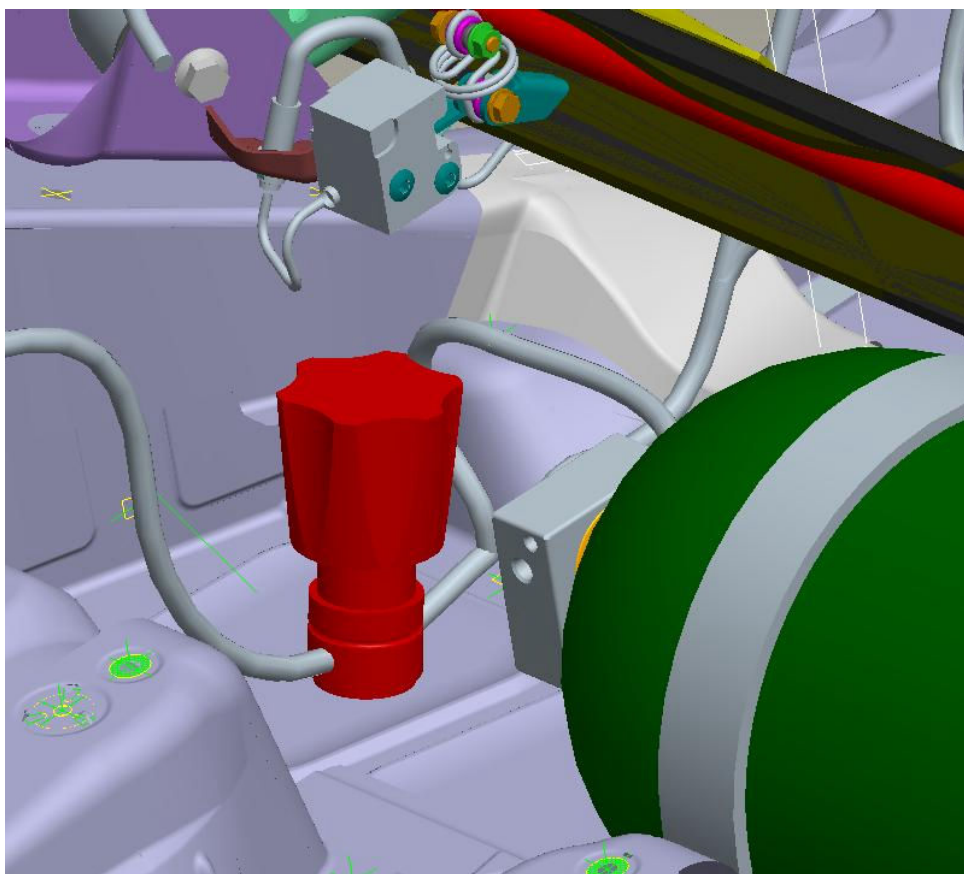
Jak bylo zmíněno v kapitole 2.3.5, nejsou zveřejněné charakteristiky uváděny v jednotkách soustavy SI. Vhodný regulátor musí omezit vstupní tlak na konstantní výstupní tlak 10 MPa. Vhodným regulačním prvkem může být ventil od firmy RHPS (Nizozemí) s označením RSHN2-02-4-VVP-LNV. Ventil umožňuje regulaci výstupního tlaku na konstantní hodnotu. Pro bezpečné použití by ovšem bylo nutné ventil dovybavit plombou chránící před změnou nastavení. Základní rozměry ventilu jsou na obrázku 62.





Obrázek 62 – Základní rozměry regulačního ventilu RSHN2-02-4-VVP-LNV (RHPS B.V., [www.rhps.nl](http://www.rhps.nl), 9.4.2008)

Podle dostupných informací byl v programu ProEngineer vytvořen model, jehož zabudování do vozu je na obrázku 63.

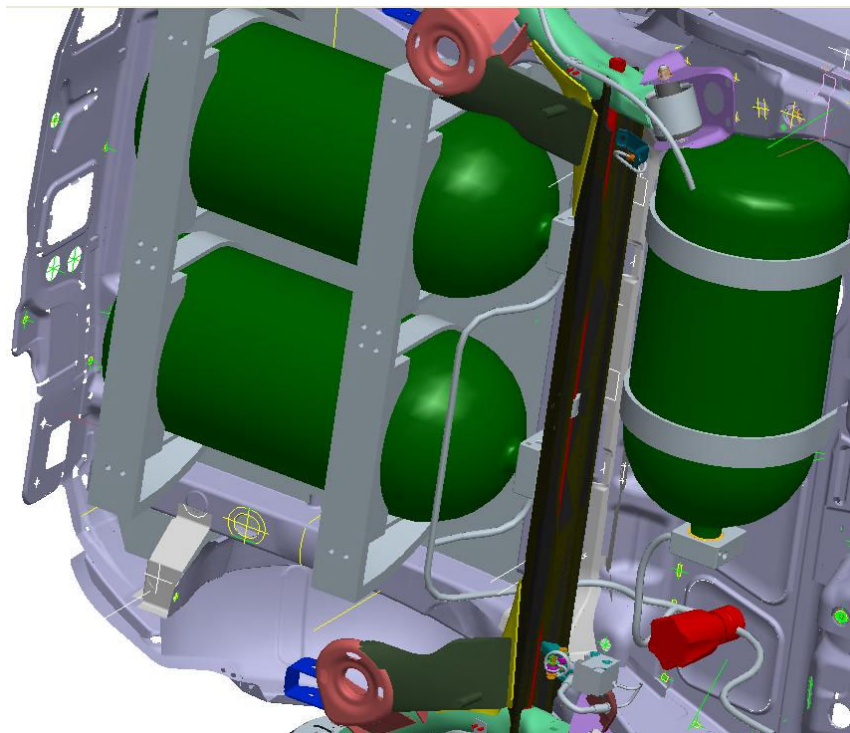


Obrázek 63 – Umístění regulačního ventilu

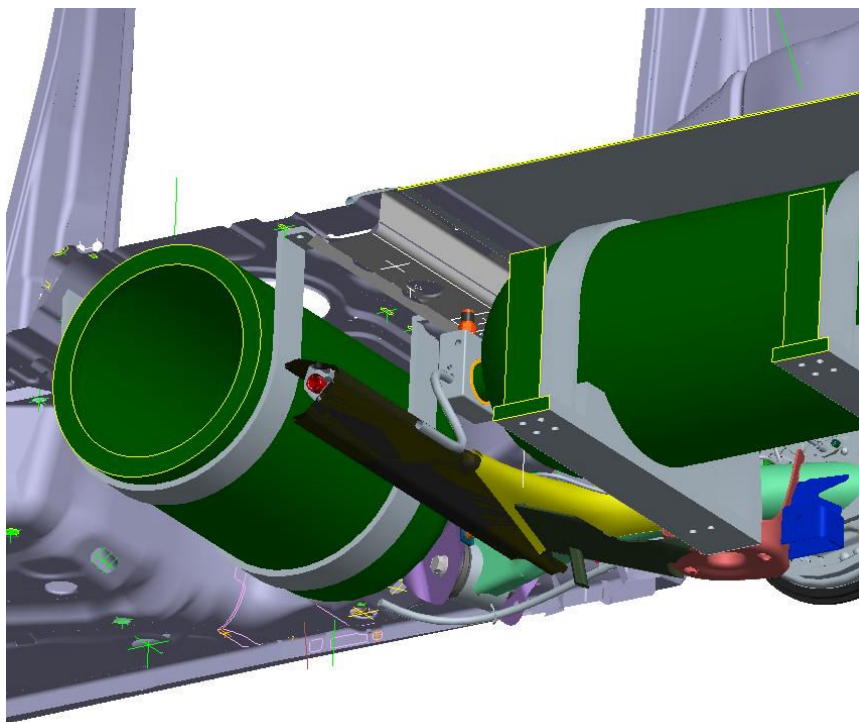
Ventil je umístěn v zadní části vozu v blízkosti pojistných ventilů. Vedení pracující s velmi vysokým tlakem je kratší. Přívod vodíku k injektorům je veden s požadovaným regulovaným tlakem.

### 3.4 Zobrazení zabudovaného vodíkového palivového systému

Kompletní zobrazení komponentů zabudovaných ve voze Škoda Roomster je na obrázcích 64 a 65.



Obrázek 64 – Zobrazení umístění nádrží, regulačního ventilu a části vedení



Obrázek 65 – Řez nádrží na vodík ve vozidle

Vedení mezi plnicím ventilem a pojistnými ventily na nádržích je hadicemi Parker polyflex 2X80N-04V10 o vnitřním průměru 6 mm. Hadice jsou vícevrstvé, vnitřní vrstva je polyamidová, tlakovému namáhání odolává pomocí vyztužení ocelovým drátem a aramidovým vláknem. Vnější obal je polyuretanový. Řez hadicí je na obrázku 66.



Obrázek 66 – Řez hadicí Parker polyflex 2X80N (Parker Hannifin, [www.parker.com](http://www.parker.com), 28.1.2008)

Podle údajů uváděných výrobcem jsou hadice vhodné pro zatížení tlakem 70 MPa. Minimální ohybový rádius, který hadici nepoškodí, je 38 mm. Vnější průměr je 13,3 mm. Stejný typ hadice vede i od pojistných ventilů do regulačního ventilu. Do motorového prostoru vede hadice typu 2040N.

Celý systém je zespodu chráněn proti poškození krytem. Ten by měl eliminovat možnost poškození nádrží a jejich proražení. Jeho aplikací se usnadní montáž, neboť celý systém se pak dá vkládat jako modul. Podobný princip využívá výše zmíněný Volkswagen Touran ve verzi s pohonem na CNG.

Od plnicího ventilu vede hadice stejnou cestou jako palivo v případě pohonu na benzin. Odtud je tok rozvětven k jednotlivým nádržím. Vedení k zadním nádržím je protaženo mezi podlahou a nápravou.

## 4 Závěr

Vodíkový pohon se jeví jako vhodná náhrada pohonu na benzin nebo naftu. Vodík vykazuje prakticky nulové emise, jako zdroj energie je obnovitelný. Masivnějšímu využití prozatím brání vysoká energetická náročnost výroby, chybějící infrastruktura, obtížné skladování a díky nižší hustotě energie vodíku také nutnost použití dražších materiálů schopných odolávat velmi vysokému tlaku. Pokud se jedná o přestavbu již vyráběného vozu je dalším problémem zvýšení jeho hmotnosti.

Aplikovaný systém vodíkového pohonu ve voze Škoda Roomster pracuje s maximálním tlakem v nádržích 70 MPa. Tlakové nádoby proto využívají nejmodernějších kompozitových materiálů. Řídící a pojistné prvky ukazují vysokou přesnost zpracování a eliminují tak možné netěsnosti. Celý systém je vhodné chránit proti poškození krytem.

Vozidlo je těžší proti v současné době vyráběnému modelu s pohonem na benzin zhruba o 130 kg. Předpokládaný posun těžiště vozu je blíže k zadní nápravě. Dá se také předpokládat zhoršení jízdní dynamiky. Proto je vozidlo vhodné zejména do městského provozu, kde by byl provoz ekologicky přínosný. Navíc vůz nedisponuje dnes obvyklým jízdním dosahem, což při prakticky neexistující síti čerpacích stanic využití vodíku značně omezuje. Proto se domnívám, že plné využití vodíku nastane až po zlevnění jeho výroby a vybudování potřebné infrastruktury.

## 5 Seznam použité literatury

- [1] Vlk F.: Alternativní pohony motorových vozidel, vlastním nákladem, Brno 2004
- [2] Vlk F.: Paliva a maziva motorových vozidel, vlastním nákladem, Brno 2006
- [3] Vlk F.: Stavba motorových vozidel, vlastním nákladem, Brno 2003
- [4] Česká vodíková technologická platforma: informační materiály
- [5] Ludwig-Bölkow-Systemtechnik GmbH: informační materiály
- [6] BMW AG: informační materiály firmy ohledně vodíkového pohonu
- [7] Ford Motor Co.: informační materiály firmy ohledně vodíkového pohonu
- [8] Honda Motor Co.: informační materiály firmy ohledně vodíkového pohonu
- [9] Toyota Motor Corporation: informační materiály firmy ohledně vodíkového pohonu
- [10] General Motors Corporation: informační materiály firmy ohledně vodíkového pohonu
- [11] Auto Tip – motoristický magazín, Axel Springer, Praha 2005 – 2008
- [12] Internetový magazín o automobilech [www.auto.cz](http://www.auto.cz)
- [13] Skalák P.: Přednáška o pasivní bezpečnosti vozidel, 2006
- [14] Parker Hannifin Corporation: informační materiály o produktech – vysokotlaké vedení
- [15] Goodridge Ltd.: informační materiály o produktech – vysokotlaké vedení
- [16] WEH GmbH: informační materiály o produktech – plnicí ventily, tankovací pitole
- [17] OPW Fueling Components: informační materiály o produktech – plnicí ventily, tankovací pitole
- [18] Faber Industrie S.p.A.: informační materiály o produktech – tlakové nádoby
- [19] Dynetek Europe GmbH: informační materiály o produktech – tlakové nádoby, pojistné ventily
- [20] GHR Hochdruck-Reduziertechnik GmbH: informační materiály o produktech – pojistné ventily
- [21] Fuel Cell and Hydrogen Network NRW: informační materiály
- [22] VIPS – Volkswagen Intellectual Property System: databáze patentů, přehled patentovaných produktů
- [23] Cerha J.: Hydraulické a pneumatické mechanismy I., TU Liberci, Liberec 2006
- [24] Matějovský V.: Automobilová paliva, Grada Publishing, a.s., Praha 2005
- [25] Škoda Auto, a.s.: informační materiály firmy ohledně modelu Roomster
- [26] Škoda Auto, a.s.: interní dokumentace k modelu Roomster
- [27] Volkswagen AG: informační materiály ohledně vozu VW Touran Eco Fuel
- [28] Circle Seal Control, Inc.: informační materiály o produktech – regulační ventily
- [29] RKI: informační materiály o produktech – čidla detekující přítomnost vodíku
- [30] Scholz C.: Výzkum a vývoj vodíkového motoru, Liberec 2007
- [31] Scholz C., Blažek J.: Zařízení pro emisní testy osobních automobilů, Liberec 20007